وزارة التعليم العالي

# محاضرات فاينمان

# في الفيزياء

## الجزء الأول

(القسم الثاني)

## الضوء والاشعاع

ترجمة

فئة من اساتذة الفيزياء في جامعة دمشق

مطبعة جامعة دمشق

١٣٩٤ هـ - ١٩٧٤ م

وزارة التعليم العالي

# محاضرات فاينمان

# في

# الفيزياء

## الجزء الأول

### ( القسم الثاني )

# الضوء والاشعاع

ترجمة

فئة من أساتذة الفيزياء في جامعة دمشق

مطبعة جامعة دمشق

١٣٩٤ هـ - ١٩٧٤ م

عيسى أبو يوسف الكويتي

بسم الله الرحمن الرحيم

# مقدمة المترجمين

كانت لنا من تعريب هـذا الكتاب غايتان : فأما أولاهما فهي أن ندل طلابنا على فكر عالم شرّفه أقرانه بجائزة نوبل ، واستاذ لم يكتف بما أبدعه في العلم من مآثر جليلة ، بل عني أيضاً بأن يكتب للجيل الجديد من الطلاب الذين سينبغ من بينهم علماء المستقبل . وقد نقل هـذا الكتاب إلى لغات عديدة ، وبلغ منزلة رفيعة .

وأما غايتنا الثانية فقد كانت أن نعمل يداً واحدة ، نحن أساتذة الفيزياء ، لنغذي مكتبتنا الفيزيائية العربية بأمهات الكتب وأحسن المصادر . فهذا الجزء الأول ثمرة جهود أساتذة الفيزياء ، الذين كانوا قائمين على التدريس ، في جامعة دمشق ، في العـام الجامعي ١٩٧٢ –١٩٧٣ *. أما الجزء الثاني فإننا نرجو أن يعمل في إعداده أساتذة الفيزياء في جامعات الجمهورية العربية السورية قاطبة ؛ وقد أعدت لذلك الخطة ، وتم الاتفاق . وكذلك سيكون شأن الجزء الثالث إن شاء الله . ولا يقف أملنا عند حدود قطرنا العربي السوري ، بل اننا نرجو

---

* هم الدكاترة : الياس ابو شاهين ، طاهر تربدار ، مكي الحسني ، أحمد الحصري ، مصطفى حمو ليلا ، جان رومانوس ، فوزي عوض ، عبد الرزاق قدورة ، محمد قعقع ، عدنان مصطفى .

أن نعمل ، في غدٍ قريب ، مع أخوان فيزيائيين لنا كرام ، من أقطار عربية أخرى ، لنسهم معاً في نقل العلم الى لغتنا المباركة ، الى أن تعود منبتاً له ومناراً كشأنها في أيام مجيدة خلت .

ونحن نشكر لكل من قدم إلينا يد العون عند إخراج هذا الكتاب ، ونخص السادة المسؤولين في وزارة التعليم العالي ، الذين رعوا عملنا ، ومهدوا سبيلنا .

المترجمون

# مقدمة فاينمان

هذه هي محاضرات الفيزياء التي ألقيتها ، في العام الماضي ، وفي العـام الذي سبقه ، على طلاب السنتين الأولى والثانية من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا



( كالتك ) . وليست المحاضرات المنشورة طبعاً نسخة طبق الأصل عن المحاضرات التي ألقيتها ، فقد أُعيدت صياغتها كثيراً أو قليلاً . وهذه المحاضرات جزء فقط من المقرر الكامل. فقد كانت المجموعة الكاملة من الطلاب ، وعددهم مائة وثمانون

طالبا ، تحضر مرتين في الاسبوع إلى مدرج كبير لتستمع فيه الى المحاضرات ؛ ثم كانت المجموعة تنقسم بعد ذلك الى زمر صغيرة ، في كل منها بين خمسة عشر طالباً وعشرين ، فتنظر كل زمرة في المحاضرات تحت إشراف معيد . وبالاضافة الى ذلك كانت تقام جلسة مخبرية واحدة في كل اسبوع .

لقد كانت المسألة المحددة التي سعينا الى حلها في هذه المحاضرات هي الحفاظ على شغف الطلاب الذين يملؤهم الحماس ويزينهم الذكاء ، والذين يأتون من مدارسهم الثانوية الى كالتك . فقد سمع هؤلاء الطـلاب ، قبل انتسابهم الى جامعتنا ، أحاديث كثيرة عن مبلغ عظمة الفيزياء وطرافة مواضيعها ، فسمعوا عن نظرية النسبية وعن الميكانيك الكوانتي ، وعن أفكار حديثة أخرى . وكان العديدون منهم في الماضي ، بعد قضائهم عامين في دراسة مقررنا السابق ، يصابون باليأس ، لأنهم كانوا لا يصادفون ، إلا نادراً ، أفكاراً عظيمة حقاً وحديثة فعلاً ، بل كانوا يلزمون بدراسة المستويات المائلة ، والكهرباء الراكدة ، وما يشبهها ، فلا ينقضي عليهم العامان الدرسـيان إلا وقد أمضتهم تفاهة ما يُعلَّمون . فكانت مسألتنا نحن هي أن نتبين فيما إذا كان في وسعنا أن نصمم مقرراً قادراً على إنقاذ الطالب النابه الشغوف بالحفاظ على حماسه .

وليست الغاية من هذه المحاضرات أن تؤلف مقرراً يلم بالفيزياء إلماماً سطحياً ؛ بل هي محاضرات في غاية الجدية . ولقد عنيت بأن أُوجهها الى أذكى الطلاب في الصف ، بل سعيت الى أن أتأكد من أن أذكى الطلاب أنفسهم لن يكونوا قادرين على استيعاب كل شاردة وواردة فيها ، وجعلت سبيلي الى ذلك ما ضمنته إياها من اقتراحات بتطبيقات للأفكار والمفاهيم المعروضة في مناحٍ مختلفة غير منحى المناقشة الرئيسي . ولهذا السبب نفسه بذلت غاية الجهد في جعل كل عباراتي دقيقة الى أبعد حد ممكن ، وفي الإشـارة ، في كل مناسـبة ، الى موضع المعادلات والأفكار المعروضة في هيكل الفيزياء العام ، وفي التنبيه الى التغيير

الذي سيطرأ على الأمور التي يتعلمها الطلاب متى قادتهم دراستهم المقبلة إلى التعمق فيها . وقد اعتقدت أيضاً أن من المهم أن أشير ، أمام هؤلاء الطلاب ، إلى ما ينبغي عليهم أن يكونوا قادرين على استنتاجه بأنفسهم ، بالاستناد إلى ما سبق ذكره لهم ، وذلك إذا كانوا أذكياء حقاً ذكاءً كافياً ، وإلى ما هو فعلاً إضافة جديدة لا يمكن استنتاجها . فعندما كنت أعرض أفكاراً جديدة ، كنت أسعى إما إلى استنتاجها ، إذا كان ذلك أمراً ممكناً ، أو إلى بيان أنها فكرة جديدة لا أساس لها بين الأمور التي سبق وتعلموها ، ولا أمل في البرهان عليها ، بل إنما هي إضافة إلى ما سبق .

وفي مطلع هذه المحاضرات ، افترضت أن الطلاب كانوا على علم ببعض المواضيع عند تخرجهم ، من المدرسة الثانوية ، فافترضت أنهم قد تعلموا الضوء الهندسي ، وبعض الأفكار الكيميائية البسيطة ، وما شابه ذلك . وكذلك لم أر أي داع إلى إلقاء المحاضرات في أي ترتيب محدد ، بمعنى أن أُحرِّم على نفسي ذكر أمر قبل الوصول إلى المرحلة التي تمكنني من مناقشته مناقشة مفصلة . بل كثيراً ما تحدثت عن أشياء مقبلة دون أن أناقشها مناقشة كاملة . وأجّلْت المناقشة الكاملة إلى وقت لاحق يكون فيه اعدادي لها قد أصبح أكثر تقدماً . ومن أمثلة ذلك دراسة التحريضيات ، وسويات الطاقة ، التي أعرضها ، لأول وهلة ، عرضاً وصفياً فقط ، ثم أعود ، فيما بعد ، إلى دراستها دراسة أقرب إلى الكمال .

وفي الوقت نفسه الذي كنت اتجه فيه بمحاضراتي إلى الطالب النشيط ، كنت أيضاً حريصاً على أن أعنى بأخيه الذي تقلقه التفاصيل الاضافية والتطبيقات الجانبية ، والذي يعجز عن أن يستوعب القسم الأعظم من محتويات المحاضرات . فسعيت إلى أن أزود مثل هؤلاء الطلاب ، الذين هم أضعف من سواهم ، بزاد أدنى ، هو النواة المركزية ، أو العمود الفقري ، الذي يستطيعون أن

يستوعبوه . وحتى إذا عجز أحد هؤلاء الطلاب عن أن يفهم كل شيء في المحاضرة، فقد كنت آمل ألا يغلبه القلق . فأنا لم أكن أتوقع منه أن يفهم كل شيء ، بل أن يفهم الأجزاء المركزية المباشرة فقط . ولا ريب في أنه يحتاج إلى بعض الذكاء لكي يستطيع أن يميز النظريات المركزية والأفكار المركزية ، وأن يفصلها عن التفاصيل الجانبية والتطبيقات ، التي تكون أكثر تقدماً ، والتي لا يستطيع أن يفهمها إلا في أعوام لاحقة .

لقد كانت هناك صعوبة جدية واحدة عند إلقاء هذه المحاضرات : فإن الطريقة التي دُرِّس بها المقرر حالت بين المحاضر وبين تلقي أي رد ، من ردود فعل الطلاب ،قادر على أن يبين له مقدار فهمهم للمحاضرات . وهذه حقاً صعوبة عظيمة الشأن ، ولذلك فإني لا أعرف مدى صلاح هذه المحاضرات . فهذا الجهد كله لم يكن إلا تجربة . ولو قمت به ثانية، لما قمت به بالشكل نفسه . وأنا أرجو ألا أضطر إلى القيام به ثانية . ولكني أعتقد أن الامور سارت على ما يرام في السنة الأولى .

أما في السنة الثانية فقد كان رضائي أقل . ففي القسم الأول من المقرر ، وهو العائد للكهرباء والمغناطيسية،لم أتمكن من أن أجد أية طريقة مرموقة فعلاً، أو أية طريقة مبتكرة ، لعرض هذا القسم ، طريقة تكون حقاً أكثر تشويقاً من الطريقة المألوفة . ولذلك فإني لا اعتقد أني قمت بعمل مجد كثيراً في محاضرات الكهرباء والمغناطيسية . وفي نهاية السنة الثانية ، كانت نيتي الاصلية هي أن انتقل ، بعد الكهرباء والمغناطيسية ، إلى اعطاء بعض المحاضرات الاضافية حول خواص المواد،ثم ، بشكل خاص ، الى دراسة الطرز الأساسية، وحلول معادلة الانتشار ، والجمل المهتزة ، والتوابع المتعامدة . . . ، أي الى عرض المراحل الأولى مما يسمى عادة « الطرائق الرياضية للفيزياء » . وعندما انظر الى الماضي الآن ، يتراءى لي أنني لو قمت بالعمل ثانية لعدت الى فكرتي

الأصلية هذه. ولكن لما كانت الخطة الموضوعة تقضي بألا تكرر هذه المحاضرات، فقد ذهب الاقتراح إلى أنه قد يحسن أن أحاول اعطاء مدخل إلى الميكانيك الكوانتي . وهذا ما ستجدونه في الجزء الثالث .

ان من الواضح تماماً أن الطلاب ، الذين يتخذون الفيزياء دراسة أساسية لهم ، يستطيعون أن ينتظروا الى السنة الثالثة لدراسة الميكانيك الكوانتي . ولكن ، من جهة أخرى ، عرض البعض حجة تذهب إلى أن كثيراً من الطلاب ، الذين يدرسون مقررنا ، يدرسون الفيزياء كقاعدة مساعدة لاهتمامهم الاساسي المركز على فروع أخرى . والطريقة المعتادة في دراسة الميكانيك الكوانتي تؤدي الى جعل هذا الموضوع مستحيل المنال تقريباً للغالبية العظمى للطلاب لانهم يحتاجون إلى وقت طويل جداً لدراسته . ومع ذلك ، فإن تطبيقاته الحقيقية ، وخاصة منها تطبيقاته الاكثر تعقيداً، كالتي تصادف في الهندسة الكهربائية وفي الكيمياء، لا تستخدم الصياغة الكاملة لطريقة المعالجة بالمعالات التفاضلية . ولذلك سعيت إلى أن أصف مبادىء الميكانيك الكوانتي بطريقة لا تتطلب من دارسها أن يعرف أولاً المعادلات التفاضلية الجزئية . وحتى في حالة الفيزيائي نفسه ، فاني اعتقد ان من المفيد ان يسعى الانسان الى سلوك هذه الطريق ، أي الى عرض الميكانيك الكوانتي بأسلوب يعاكس الاسلوب المألوف ، وذلك لاسباب عديدة قد تكون واضحة في المحاضرات نفسها . ومع ذلك فاني اعتقد ان التجربة في الجزء المخصص للميكانيك الكوانتي لم تكن تجربة ناجحة نجاحاً كاملاً ، وذلك ينبع ، بشكل رئيسي ، من انه لم يكن لدي فعلاً متسع كافٍ من الوقت في نهاية المقرر . ( فقد كان يلزمني مثلاً ثلاث محاضرات اضافية او اربع لأستطيع معالجة مواضيع عصابات الطاقة والتبعية المكانية للسعات معالجة اكثر شمولاً ) . وكذلك فاني لم اكن قد عرضت الموضوع بهذا الشكل ، قبل ذلك ، ابداً ، ولذلك كان انعدام رد الفعل من الطلاب ذا اثر سيء جداً . وانا اعتقد الآن ان

الميكانيك الكوانتي ينبغي أن يُدرَّس في مرحلة لاحقة . وقد تتاح لي الفرصة مرة أخرى لأعرضه . وعندئذ سأقوم بعرضه كما يجب .

ان السبب الذي يبرر فقدان محاضرات حول كيفية حل المسائل ، هو أنه كانت توجد جلسات مذاكرة واعادة . وعلى الرغم من اني القيت ثلاث محاضرات في السنة الاولى حول كيفية حل المسائل ، فانها غير مضمنة في هذا الكتاب . وقد كانت هناك ايضاً محاضرة حول التوجيه العطالي ، وهي محاضرة تنتمي بلا شك إلى المحاضرات حول الجمل الدائرة ، ولكنها لم تدرج في الكتاب لسوء الحظ . والمحاضرتان الخامسة والسادسة هما محاضرتان القاهما ماثيو ساندس لأني كنت مسافراً .

ان السؤال طبعاً هو : الى اي حد نجحت هذه التجربة ؟ . وانطباعي الشخصي ، الذي لا يشاركه مع ذلك اكثر الذين عملوا مع الطلاب ، انطباع متشائم . فأنا لا اعتقد اني قد احسنت صنعاً لدى الطلاب . وعندما انظر الى طريقة معالجة اكثر الطلاب للمسائل التي اعطوها في الامتحانات ، اعتقد ان المحاولة قد أخفقت . ويشير اصدقائي طبعاً الى ان هناك بضعة عشر طالباً قد فهموا تقريباً كل شيء في المحاضرات ، وهذا امر يدعو الى الدهشة ، وكانوا نشيطين جداً في معالجة المواضيع ، وكانوا يهتمون بالنقاط العديدة اهتماماً يملؤه الحماس والشعف. وقد أصبح هؤلاء الاشخاص يملكون الآن في اعتقادي أساساً ممتازاً في الفيزياء ؛ وهم ، على كل حال ، الذين كنت أسعى الى الاتصال بهم ، ولكن ينبغي ان لا ننسى أن « لا خير كبير في التعليم ، إلا لنفر أوتوا الفطنة فاستغنوا عنه أو كادوا » . ( غيبنز ) .

وعلى كل ، فقد كان همي ألا اخلف اي طالب ورائي تماماً ، وقد اكون فعلت ذلك عن غير قصد . واعتقد ان من اساليب مساعدة الطلاب ، مساعدة اجدى ، بذل جهد اكبر في اعداد مجموعة من المسائل تفيد في ايضاح بعض

الافكار في المحاضرات . والمسائل فرصة حسنة لتدعيم محتوى المحاضرات ، ولجعل الافكار المعروضة فيها ألصق بالواقع ، وأقرب الى الكمال ، وادعى الى الرسوخ في الذهن .

ولكني اعتقد مع ذلك انه لا يوجد أي حل آخر لهذه المسألة التربوية ، الا الادراك بان افضل تعليم لا يمكن ان يتم الا متى قامت صلة فردية مباشرة بين الطالب وبين الاستاذ القدير ، اي متى تحققت حالة يناقش فيها الطالب الافكار ، ويفكر في الامور ، ويتحدث عن الاشياء . ومن المستحيل ان يتعلم الانسان كثيراً بالاستماع الى محاضرة ، او حتى بحل مسائل مطروحة . ولكن عدد الطلاب الكبير ، في عصرنا الحاضر هذا ، يلزمنا بأن نحاول البحث عن بديل لهذا الحل المثالي . وقد تسهم محاضراتي بعض الاسهام في ذلك . وقد توجد في بقعة صغيرة من الأرض مجموعة من اساتذة وطلاب ، يستوحون شيئاً من هذه المحاضرات ، او يجدون فيها بعض الافكار . وقد يلقون متعة في التفكير في هذه المحاضرات او في السعي الى دفع بعض افكارها الى الامام .

حزيران ١٩٦٣ .

**ريتشارد ب . فاينمان**

# مقدمة لايتون

هـذا الكتاب* مؤلف من مجموعة المحـاضرات ، التي تشـكل مدخلاً الى الفيزياء ، والتي القاها الاستاذ ر. ب. فاينمان في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا خلال العام الجامعي ١٩٦١ - ١٩٦٢ ؛ وهو يغطي السـنة الأولى من مقرر اعدادي يدرسه كل طلاب السنتين الأولى والثانية من كالتك** ؛ وقد تلته في العام الجامعي ١٩٦٢ - ١٩٦٣ سلسلة اخرى من المحاضرات غطت موضوعات السنة الثانية . وتشكل هذه المحاضرات جزءاً أساسياً من اصلاح اساسي لمحتوى المقرر الاعدادي ؛ وقد استغرق هذا الاصلاح أربـع سنوات كاملة .

لقد نبتت الحاجة الى هذا الاصلاح الجذري من نمو الفيزياء السريـع خلال العقود الأخيرة من عصرنا هذا ، ومن ارتقاء المقدرة الرياضية للطلاب ، المنتسبين الى الجامعة ، ارتقاءً مستمراً يرجع الفضل فيه الى تحسين محتوى مقررات الرياضيات في المدارس الثانوية . وقد كان أملنا هو أن نفيد من هـذه القاعدة الرياضية المتقدمة ، وأن نضمن مقررنا مقداراً كافياً من المواضيـع الحديثة . يجعله اكثر شحذاً لهمم الطلاب ، وأعظم استثارة لشغفهم ، واحسن تمثيلاً للفيزياء المعاصرة .

وقد سعينا الى أن نجمع آراء متعددة بشأن المواضيـع التي يحسن ادراجها ، وبشأن وسائل عرضها ، فرجونا عدداً كبيراً من اعضاء قسم الفيزياء ان يقدموا

---

* طبع الكتاب العربي في ثلاثة اجزاء . ( المترجمون )

** اسم مختصر لمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا California Institute of Technology

لنا افكارهم في صورة مخطط للمقرر المقترح . وقد وصلتنا عـدة مخططـات ، وجرت مناقشتها مناقشة تفصيلية وانتقادية . وما لبث أن تم الاتفاق على أن اصلاحاً جذرياً للمقرر لا يمكن ان يتحقق باعتماد كتاب مقرر آخر ، ولا حتى بتأليف كتاب مقرر جديد قبل الشروع في تدريس المقرر ، بل تبين انه لا بد من ان يتركز المقرر الجديد حول مجموعة من المحاضرات تلقى بمعدل محاضرتين او ثلاث في كل اسبوع ، على ان يعـد النص المكتوب المناسب بعد القـاء المحـاضرة بشكل يواكب تطور المقرر ، وعلى أن تهيأ تجارب مخبرية مناسبة ترتبط بمحتوى المحاضرات . واعتماداً على هذا الرأي ، أعد مخطط تقريبي للمقرر ، ولكن اتفق ، منـذ البدء ، على انه مخطط غير كامل ، وأنه ليس الا مشروعاً خاضعاً لإمكان التعديل تعديلاً عميقاً من قبل من سيحمل مسؤولية اعـداد المحاضرات فعلاً .

أما بشأن وسائل تحضير المقرر نفسه ، فقد نوقشت عدة خطط ممكنة . وكانت هذه الخطط متشابهة الى حد بعيد ، مستندة الى تعاون يقوم بين بضعة اساتذة يقتسمون الحمل الكلي اقتسـاماً متناظراً ومتساوياً : فيكون كل منهم مسؤولاً عن نصيبه من المادة العلمية ، فيلقي المحاضرات العائدة لهـذا النصيب ، ويكتب النص المرتبط به . إلا ان عدم توافر العـدد الكافي من الاساتذة ، وصعوبة الحفـاظ على وجهة نظر واحدة ، بسبب اختلاف الشخصيات والمفاهيم لدى الاساتذة المساهمين ، جعلت تنفيذ احدى هذه الخطط امراً متعذراً .

واخيراً اوحيَ الى الاسـتاذ ساندس بأمر رائع هو اننا نملك الوسـيلة ، لا لخلق مقرر فيزيائي جديد ومختلف عن سواه ، فحسب ، بل ربمـا لخلق مقرر فريد من نوعه . فاقترح الاسـتاذ ساندس أن يعد الاسـتاذ ر. ب. فاينمان المحاضرات ، وأن يلقيها ، وأن تسجل هذه المحاضرات على شريط مغناطيسي .

فمتى أستنسخت ، وصيغت صياغة النص المكتوب ، اصبحت هي كتاب المقرر الجديد ، وهذه هي الخطة التي اتبعناها .

وقد كنا نتوقع أن تكون الصيغة امراً هيناً ، لا يتعدى الحصول على الاشكال ، والتحقق من صحة التنقيط والقواعد ،وكنا نأمل ان يقوم به طالب من طلاب الدراسات العليا ، او طالبان ، يخصصان له بعض وقتهما . إلا ان الخيبة كانت مصير أملنا هذا. فقد تبين أن الصياغة عمل واسع يمليه نقل المحاضرة الملقاة الى نص مقروء ، حتى اذا لم ندخل في حسابنا اعادة تنظيم الموضوع ، ومراجعته ، وهما أمران فرضتهما الظروف احياناً ايضاً . ولم يكن هذا عملاً يمكن أن يقوم به منشىء محترف ، ولا طالب من طلاب الدراسات العليا ، بل كان جهداً يتطلب عناية فيزيائي محترف ،يعمل في صياغة كل محاضرة مدة من الزمن تتراوح بين عشر ساعات وعشرين ساعة !

ان صعوبة عمل الصياغة هذا ، بالاضافة الى ضرورة وضع المواد العلمية بين ايدي الطلاب باسرع ما يمكن ، وضعت حداً قاسياً على مقدار « صقل » المواد الذي يمكن القيام به ، وهكذا كنا مضطرين إلى ان نسعى الى اعداد نص مؤقت وحسن يمكن للطلاب استخدامه مباشرة ، بدلاً من ان نضيع جهودنا في اعداد نص نهائي ومصقول صقلاً كبيراً . وبسبب الحاجة الى انتاج نسخ عديدة لتلبية حاجات طلابنا، وبسبب ما لمسناه من اهتمام عظيم أبداه المدرسون والطلاب في مؤسسات جامعية أخرى متعددة ، قررنا أن ننشر المادة العلمية في شكلها المؤقت بدلاً من ان ننتظر مراجعتها مراجعة جذرية أخرى ، وهي مراجعة قد لا تمكن الايام من القيام بها أبداً . ولا تراودنا الاوهام أبداً بشأن كمال المادة العلمية المعروضة هنا ، ولا بشأن حسن صقلها ، ولا بشأن اكتمال المنطق في تنظيمها ؛ بل اننا في الواقع عازمون على القيام ببعض تعديلات طفيفة في المستقبل القريب ، ونحن نأمل ألا يتحجر محتوى هذا الكتاب ولا شكله .

وبالاضافة إلى المحاضرات ، التي تشكل جزءاً مركزياً هاماً من المقرر ، كان من الضروري أيضاً إعداد تمارين مناسبة لإنمــــاء خبرة الطلاب ومهارتهم ، وتحضير تجارب مناسبة تؤمن لهم أن يتعرفوا في المخـبر مباشرة على المواضيع المعروضة في المحاضرات . ولم يبلغ هذان المظهران مرحلة التقدم التي بلغتهـا المحاضرات ، ولكننا تقدمنا في إعدادهما تقدماً محسوساً . وقد أعدت بعض التمارين أثناء فترة القاء المحاضرات ، ثم وسعت وعمقت عند استخدامها في العام التالي . إلا أننا ما نزال غير مقتنعين بعد بأن التمارين تتضمن مقداراً من الشمول ومن العمق في معالجة مادة المحاضرات العلمية ، كافية لجعل الطالب يدرك القدرة الهائلة الموضوعة تحت تصرفه ، ولذلك فإن التمارين قد طبعت في كتاب منفصل، وبشكل من الطباعة يوحي بأنها مؤقتة ويدعو إلى مراجعتها مراجعة حثيثة* .

وقد صمم الاستاذ هـ. ف. نيهر عدداً من التجارب الجديدة للمقرر الجديد . ومن بينها تجارب عديده تستخدم الاحتكاك المنخفض جـــداً الذي يتصف به الحامل الغازي : وهو قناة هوائية مستقيمة ، بنيت حديثاً لاجراء قياسات كمية على الحركة ذات البعد الواحد ، وعلى التصادمات ، والحركة التوافقية ؛ أو هو دوامة ماكسويل محمولة على الهواء ، ومحركة بالهواء ، ويمكن بواسطتها دراسة الحركة الدورانية المتسارعة ، ومبادرة الجيروسكوب وترنحـه . ونتوقع أن يستمر تطوير التجارب المخبرية الجديدة زمناً طويلاً .

أشرف على برنامج الاصلاح هذا الاساتذة ر . ب . لايتون ، و هـ . ف . نيهر و م . ساندس . وقـــد اشترك في البرنامج بشكل رسمي الاساتذة ر . ب . فاينمان ، وج . نويغباور ، و ر . م . ستن ، و هـ . ب . ستيبلر** ،

---

* ألحقنا التمارين بالفصول العائدة لها في الكتاب العربي . ( المترجمون )

** في عام ١٩٦١ – ١٩٦٢ عندما كان في اجازة جامعية من معهـــد وليامز في وليامزتاون بولاية ماساشوستس .

و ف . ستروننغ ، و ر . فوغت ، وذلك من قسم الفيزياء والرياضيات والفلك؛ والاساتذة ت . كوغي ، و م . بليسي ، و س . ه . ويلتس من قسم العلوم الهندسية . وإننا لنذكر بكل امتنان المساعدة القيمة لكل الذين أسهموا في برنامج الاصلاح . ونحن ممتنون بشكل خاص لمؤسسة فورد التي لولا مساعدتها المالية لما أمكن لهذا البرنامج أن ينفذ .

تموز ١٩٦٣ روبرت ب . لايتون

* * *

# الفصل السادس والعشرون

Optics: The principle of Least Time

# الضوء : مبدأ الزمن الأصغر

## ٢٦ ـــ ١ : الضوء   light

هذا هو أول فصلٍ من عددٍ من الفصول في موضوع الإشعاع الكهرطيسي. إن الضوء ، الذي به نرى ، ليس إلا جزءاً صغيراً من طيف واسع ذي طبيعة واحدة . ويتم التمييز بين الأجزاء المختلفة في هذا الطيف بفضل اختلاف قيم مقدارٍ ما متغير . ويمكن تسمية هذا المقدار المتغير « طول الموجة » . وهو إذ يتغير في الطيف المرئي ، يغير الضوءُ لونه ظاهرياً من الأحمر حتى البنفسجي . ولو أننا استعرضنا الطيف بالترتيب ، بدءاً من الأطوال الموجية الطويلة نحو الأطوال الموجية القصيرة ، لبدأنا بما يسمى عادة بالأمواج الراديوية . وهـــذه الأمواج الراديوية متيسرة من الوجهـة التقنية في مجـالٍ واسع من الأطوال الموجية ، وبعضها أطول حتى من الأمواج المستعملة في الإذاعات المألوفة التي تبلغ أطوالها الموجية نحو 500 متراً . ويأتي بعد ذلك ما يسمى « الأمواج القصيرة » أي أمواج الرادار والأمواج المليمترية وهلم جرا . وليس هناك حدود فعلية بين مجالٍ من الأطوال الموجية ومجالٍ آخر ، لأن الطبيعة لا تزودنا بحدود فاصلة واضحة . إن العـــدد الذي يرافق اسماً معطى للأمواج ليس إلا عدداً تقريبياً ، ومثل ذلك طبعاً الأسماء التي نسمي بها المجالات المختلفة .

وبعد أن نقطع شوطاً طويلاً في مجال الأمواج المليمترية ، نأتي إلى ما نسميه ما تحت الأحمر ، ثم إلى الطيف المرئي . وإذا واصلنا السير ، وصلنا إلى منطقة تسمى مافوق البنفسجي . وتبدأ الأشعة السينية حيث تنتهي أشعة ما فوق البنفسجي ، ولكننا لانستطيع أن نحدد بدقة أين يتم ذلك ؛ إنه يتم على وجه التقريب عند $10^{-8}m$ أو $10^{-2}\mu$ . وهذه الأشعة أشعة سينية « لينة » ، تأتي بعدها أشعة سينية عادية ، فأشعة سينية قاسية جداً ، ثم أشعة غاما وهلم جرا ، وذلك من أجل قيم أصغر فأصغر لذلك البعد المسمى طول الموجة .

وهناك ضمن هذا المجال الواسع من الأطوال الموجية ثلاث مناطق ، أو أكثر ، يصح فيها تقريب يجعلها ذات أهمية خاصة . وتقع في إحدى هذه المناطق حالة تكون فيها الأطوال الموجية المدروسة صغيرة جداً إذا ما قورنت بأبعاد المعدّات المتوفرة لدراستها ؛ أضف إلى ذلك أن طاقات الفوتون ، باستخدام النظرية الكوانتية ، تكون صغيرة إذا ما قورنت بحساسية المعدات للطاقة . ففي ظل هذه الشروط يمكننا أن نقوم بتقريب أول غير دقيق بواسطة طريقة تسمى الضوء الهندسي . أما إذا كانت الأطوال الموجية من رتبة أبعاد المعدات ، وهو أمر تصعب تهيئته في الضوء المرئي ، ولكنه أسهل في الامواج الراديوية ، وكانت طاقات الفوتون أيضاً صغيرة إلى حد الاهمال ، فإنه يمكن إجراء تقريب مفيد جداً بدراسة سلوك الأمواج ، مع صرف النظر أيضاً عن الميكانيك الكوانتي . وتستند هذه الطريقة على النظرية الكلاسيكية في الاشعاع الكهرطيسي ، التي ستتم مناقشتها في فصل لاحق . ثم ، إذا انتقلنا أخيراً إلى أمواج قصيرة جداً ، أي إلى أمواج يمكن تجاهل صفة الموجة فيها ، وتكون للفوتونات عندها طاقة عظيمة إذا ما قورنت بحساسية معداتنا ، فإن الأمور تصبح بسيطة مرة أخرى . وهذه هي صورة الفوتون البسيطة التي لن نشرحها

إلا شرحاً غير دقيق أبداً . أما الصورة الكاملة التي توحّد الامر كله في نموذج واحد فلن تتوافر لنا إلا بعد أمد طويل .

وسوف تقتصر مناقشتنا في هذا الفصل على منطقة الضوء الهندسي ، حيث نتناسى طول موجة الضوء وصفته الفوتونية التي سنشرحها كلها في الوقت المناسب . كذلك لن نهتم بأن نقول شيئاً عن ماهية الضوء ، بل نكتفي بالبحث عن كيفية سلوكه على نطاق واسع كبير إذا ما قورن بالأبعاد التي نهتم بها . إن هذا كله ينبغي ذكره لكي نؤكد على أن ما سوف نتحدث عنه ليس إلا تقريباً غير دقيق أبداً ؛ فهذا واحد من الفصول التي ينبغي علينا أن نعود الى « نبذها جانباً » . ولكننا سنفعل ذلك بسرعة كبيرة لأننا سنمضي مباشرة تقريباً الى طريقة أكثر دقة.

وبالرغم من أن الضوء الهندسي ليس إلا تقريباً ، فإنه ذو أهمية عظيمة من الوجهة التقنية وذو فائدة كبيرة تاريخياً . وسوف نقدّم هذا الموضوع على نحو تاريخي أكثر مما فعل بعض الآخرين ، وذلك لكي نعطي فكرة عن تطور النظرية الفيزيائية أو الفكرة الفيزيائية .

أولاً ، إن الضوء بلا ريب مألوف لدى كل الناس ، وقد كان كذلك منذ أمد بعيد . والسؤال الآن هو : بأية عملية نرى الضوء ؟ لقد كانت هناك نظريات عديدة ، ولكن استقر الأمر أخيراً على نظرية واحدة هي أن هناك شيئاً يدخل إلى العين ، شيئاً يرتد عن الأجسام ويدخل إلى العين . لقد سمعنا بهذه الفكرة طويلاً حتى قبلنا بهـا ، ولعله يستحيل علينا أن نصدق بأن أناساً شديدي الذكاء افترضوا نظريات مناقضة ، فافترضوا مثلاً أن شيئاً يخرج من العين ويتلمس الجسم . وهناك مشاهدات أخرى هامة ، هي أنه عندما يسير الضوء من مكان لآخر ، فإنه يسير في خطوط مستقيمة ، فيما إذا لم يقف في طريقه شيء ، وأنه لا يبدو على الأشعة أنه يتداخل بعضها مع بعض . هذا يعني

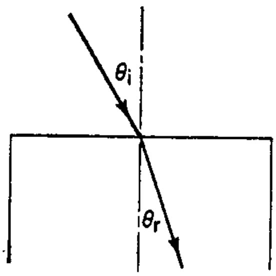
أن الضوء في الغرفة يتقاطع في كل المناحي ، ولكن الضوء الذي يتقاطع مع خط بصرنا لا يؤثر على الضوء الذي يصلنا من جسم من الأجسام . وقد كان هذا مرة حُجّة دامغة في وجه النظرية الجسيمية ؛ وقد استخدمت من قبل هوينغنز . ولو أن الضوء كان مثل عددٍ وافرٍ من الأسهم المنطلقة ، فكيف كان يمكن لأسهم أخرى أن تمر من خلالها بتلك السهولة ؟ إن مثل هذه الحجج الفلسفية ليست لها تلك الأهمية ؛ إذ يمكن المرء دائماً أن يقول بأن الضوء مؤلف من أسهم يمكن أن يمر بعضها من خلال بعض !

## ٢٦ ــ ٢ : الانعكاس والانكسار Reflection & refraction

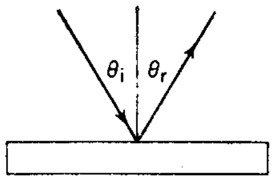
إن المحاكمة السابقة تزودنا بما يكفي عن الفكرة الأساسية في الضوء الهندسي ، وعلينا الآن أن نمضي الى أبعد من ذلك قليلاً أي الى المقوّمات الكمية . إلى هنا ، والضوء لدينا يسير ما بين نقطتين في خطوط مستقيمة فقط . لندرس الآن سلوك الضوء عندما يصدم مواد مختلفة . إن أبسط الأجسام مرآة ، والقانون من أجل المرآة هو أنه عندما يصدم الضوءُ مرآة ، فانه لا يواصل سيره على خط مستقيم ، بل يرتد عن المرآة في خط مستقيم جديد يتغير عندما نغير ميل المرآة . وقد كانت المسألة بالنسبة للأقدمين : ما هي العلاقة بين الزاويتين المدروستين ؟ إنها علاقة بسيطة جداً تم اكتشافها منذ أمد بعيد ؛ وهي أن الضوء الذي يسقط على مرآة يسير بحيث أن الزاويتين ، بين المرآة وكلٍ من الحزمتين ، تكونان متساويتين . وقد جرت العادة لسببٍ ما أن تُقاس الزاويتان بدءاً من الناظم على سطح المرآة . وعلى هذا فإن ما يسمى قانون الانعكاس هو :

$$\theta_i = \theta_r \qquad (26-1)$$

وهذا اقتراح بسيط إلى حدٍ كافٍ ، إلا أنه تواجهنا مشكلة أصعب من ذلك عندما يسير الضوء من وسط إلى وسط آخر ، من الهواء إلى الماء مثلًا ، هنا نرى أيضاً أن الضوء لا يسير في خط مستقيم . فالشعاع في الماء يكون مائلًا على مساره في الهواء ؛ وإذا غيرنا الزاوية $\theta_i$ (-) بحيث يسقط الشعاع سقوطاً أقرب الى الشاقول ، فإن زاوية « الكسر » لا تكون حينئذ كبيرة بقدر ما كانت . أما إذا أملنا حزمة الضوء بزاوية كبيرة فإن زاوية الانحراف تكون حينئذ كبيرة جداً . والسؤال هو : ما هي علاقة كلٍ من الزاويتين بالأخرى ؟ هذا أيضاً حيّر الأقدمين زمناً طويلًا ، ولم يهتدوا إلى الجواب عليه قط ! ولكنه كان مع ذلك واحداً من الميادين القليلة في فيزياء اليونان التي يمكن للمرء أن يجد فيها نتائج تجريبية مسجّلة. فقد سجل كلوديوس بطليموس قائمة بالزاوية في الماء ، من أجل كل زاويةٍ لعددٍ من الزوايا المختلفة في الهواء . ويبين الجدول (٢٦-١) الزوايا في الهواء مقدّرة بالدرجات والزوايا المقابلة لها كما قيست في الماء . ( من المألوف القول بأن علماء اليونان لم يجروا تجارب قط . ولكن من المستحيل الحصول على جدولٍ بهذه القيم دونما علمٍ بالقانون الصحيح ، ما لم يكن ذلك عن طريق التجربة . وينبغي مع ذلك أن نشير إلى أن هذه النتائج لا تمثل




الشكل (٢٦-٢)
ينكسر الشعاع الضوئي عندما ينتقل من وسط الى وسط آخر




الشكل (٢٦ - ١)
زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس

قياساتٍ دقيقة مستقلة من أجل كل زاوية ، وإنما تمثل فقط أعداداً استقرئت من بضع قياسات ، ذلك لأنها جميعها تنطبق تمام الانطباق على قطع مكافىء . )

هذه إذن إحدى الخطوات الهامة في تطور القانون الفيزيائي : في البداية نشاهد أمراً ، ثم نقيسه ونُدْرج القياسات في جدول ؛ وبعدئذ نسعى لأن نجد قاعدة يمكن وفقها أن يرتبط شيء بشيء آخر . إن الجدول العددي السابق أُنجز في عام ١٤٠ للميلاد ، ولكن لم يتيسر لأحدٍ الوصول الى القاعدة التي تربط بين الزاويتين إلا أخيراً في العام ١٦٢١ !* والقاعدة المكتشفة من قبل فِلِبْرورْد سنِل Willebrord Snell ، وهو رياضي هولندي ، هي كما يلي : إذا كانت $\theta_i$ زاوية الورود في الهواء ، وكانت $\theta_r$ زاوية الانكسار في الماء ، فإنه يتبين أن جيب الزاوية $\theta_i$ يساوي عدداً ثابتاً ما مضروباً بجيب الزاوية $\theta_r$ :

**الجدول (٢٦ - ١)**

| الزاوية في الهواء | الزاوية في الماء |
|---|---|
| 10° | 8° |
| 20° | 15 - 1/2° |
| 30° | 22 - 1/2° |
| 40° | 28° |
| 50° | 35° |
| 60° | 40 - 1/2° |
| 70° | 45° |
| 80° | 50° |

**الجدول (٢٦ - ٢)**

| الزاوية في الهواء | الزاوية في الماء |
|---|---|
| 10° | 7 - 1/2° |
| 20° | 15° |
| 30° | 22° |
| 40° | 29° |
| 50° | 35° |
| 60° | 40° |
| 70° | 48° |
| 80° | 49 - 1/2° |

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_r \qquad (26-2)$$

* نذكر بأن العرب اكتشفوا صيغة تقريبية لقانون الانكسار قبل ذلك بكثير . ( المترجمون )

ويساوي العدد n من أجل الماء 1.33 تقريباً . ويطلق على المعادلة (2 - 26) قانون سنيل ؛ وهي تمكننا من التنبؤ بكيفية انكسار الضوء عندما ينتقل من الهواء إلى الماء . ويبين الجدول (٢٦ — ٢) الزوايا في الهواء وفي الماء وفقاً لقانون سنل . لاحظ الاتفاق الرائع مع جدول بطليموس .

## ٢٦ — ٣ : مبدأ الزمن الأصغر لفرما Fermat

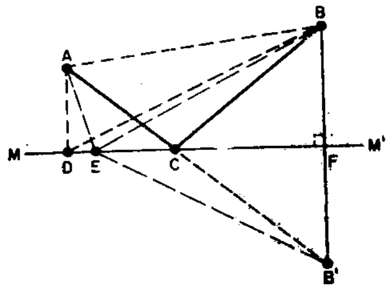
Fermat's principle of least time principle

الآن وقد تطور العلم الى مدى أبعد ، نتطلب أكثر من مجرد صيغة . في البداية نقوم بالمشاهدة ثم نحصل على أعدادٍ نقيسها ويكون لدينا بعدئذ قانون يُجمل كل الأعداد . ولكن مفخرة العلم الحقيقية هي في أننا يمكننا أن نجد طريقة في التفكير تجعل القانون يبدو بدهياً .

وأول طريقـــة في التفكير ، تجعل القانون حول سلوك الضوء بدهياً ، طريقة اكتشفها فرما حول العام ( ١٦٥٠ ) وسميت مبدأ الزمن الأصغر أو مبدأ فرما . وهذه هي فكرته : إن الطريق التي يسلكها الضوء ، من بين كل الطرق الممكنة للانتقـال من نقطة الى أخرى ، هي الطريق التي تتطلب أقصر زمن .

لنبين أولاً أن هذا صحيح في حالة المرآة ، وأن هذا المبدأ البسيط يتضمن القانونين معاً ، قانون الانتشار المستقيم وقانون المرآة . وهكذا فإن إدراكنا للأمور في ازدياد ! لنسْع إلى إيجاد حلٍ للمسألة التالية : يبين الشكل(٢٦ — ٣) نقطتين A و B ومرآة مستوية 'MM . ما هو الطريق للوصول من A إلى B في أقصر زمن ؟ والجواب هو المضي قدماً بخط مستقيم من A إلى B ! ولكن اذا أضفنا الى ما سبق أن على الضوء أن يصدم المرآة ويرتد عنها في أقصر زمن ، فلن يكون الجواب بتلك السهولة . ولعـل احدى الطرق هي السير بأسرع

ما يمكن نحو المرآة أولاً ثم الى B على المسار ADB . ولكن علينا حينئذ أن نسلك طريقاً طويلاً DB بلا ريب . وإذا نحن تقدمنا الى اليمين قليلاً ،نحو E، فإننا نطيل المسافة الأولى بعض الشيء ، ولكننا ننقص المسافة الثانية الى حد كبير ، وبذلك يقل الطول الكلي للمسار ، ويقل تبعاً لذلك زمن الرحلة . والسؤال الآن كيف نتمكن من إيجاد النقطة C التي يكون الزمن من أجلها أقصر زمن ؟ إننا نستطيع إيجادها على نحو متقن بعملية هندسية بارعة .




الشكل ( ٢٦ - ٣ )
توضيح مبدأ الزمن الاصغر

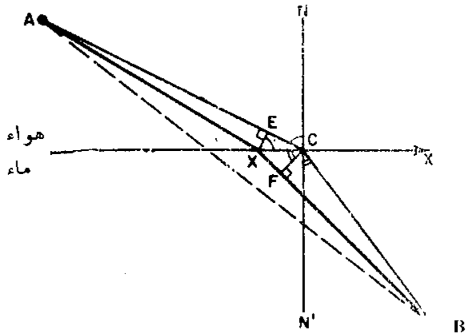
ننشيء على الجانب الآخر من MM′ نقطة صنعية B′ ، تحت المستوي MM′ وعلى بعدٍ منه يساوي بعدَ النقطة B عنه . ثم نرسم المستقيم EB′ . والآن ، لما كانت الزاوية BFM زاوية قائمة ، وكان BF = FB′ ، فإن EB يساوي EB′ . وعليه فإن مجموع المسافتين AE + EB ، الذي يتناسب مع الزمن الذي يستغرقه الضوء إذا كان ينتشر بسرعة ثابتة، يساوي مجموع المسافتين AE+EB′. وبناءً على ذلك تصبح المسألة : متى يكون مجموع هاتين المسافتين أصغر ما يمكن ؟ والجواب على ذلك سهل وهو : عندما يكون الخط المار من C والواصل بين A و B′ خطاً مستقيماً ! وبعبارة أخرى ، علينا أن نجد النقطة التي نمر بها في سيرنا المستقيم نحو النقطة الصنعية ، فتكون هي النقطة المضبوطة . والآن ، إذا كان ACB′ خطاً مستقيماً ، فإن الزاوية BCF تساوي حينئذ الزاوية B′CF ، وهي بالتالي تساوي الزاوية ACM . وهكذا نرى أن القول بأن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس يكافىء القول بأن الضوء يسير الى

المرآة بحيث أنه يرتد الى النقطة B في أقصر زمن ممكن . وفي الأصل ، قال هيرو الاسكندري إن الضوء يسير بحيث أنه يذهب الى المرآة والى النقطة الأخرى في أقصر مسافة ممكنة ، إذن فليست تلك نظرية حديثة . وقد كان هذا ما ألهم فرما أن يحدّث نفسه بأن الانكسار ربما يتم على الأساس ذاته . ولكن من الواضح أن الضوء لا يتبع في انكساره الطريق ذات المسافة الصغرى ، لذلك جرّب فرما فكرة أن الضوء يتطلب أقصر زمن .

وقبل أن نتابع إلى تحليل الانكسار ، ينبغي علينا أن نذكر ملاحظة أخرى فيما يخص المرآة . إذا كان لدينا منبع ضوئي في النقطة B يرسل ضوءه باتجاه المرآة ، فإننا نرى أن الضوء الذي يذهب الى A من النقطة B يصل الى A تماماً بالطريقة نفسها التي كان يصل بها الى A فيما لو كان هناك جسم في B′ ولم تكن هناك مرآة . وبالطبع ، لا تكشف العين إلا الضوء الذي يدخل إليها فيزيائياً ؛ وبناء على ذلك ، إذا كان لدينا جسم في B ومرآة تجعل الضوء يصل الى العين تماماً بالطريقة نفسها التي كان يصل بها الى العين لو كان الجسم في B′ ، فإن جملة الدماغ والعين تفسّر ذلك ، بافتراض أنها لا تعلم الكثير ، على أنه جسم واقع في B′ . إذن فالتوهم أن هناك جسماً خلف المرآة إنما يعود إلى أن الضوء الذي يدخل الى العين يكون دخوله إليها ، من الوجهة الفيزيائية ، تماماً بنفس الطريقة التي يدخل بها إليها فيما لو كان هناك جسم خلف المرآة (لولا اتساخ المرآة ولولا معرفتنا بوجود المرآة وغير ذلك مما يُصحّح في الدماغ) .

لنبرهن الآن على أن مبدأ الزمن الأصغر يعطي قانون سنيل في الانكسار . ولكن ينبغي علينا أن نفترض افتراضاً يتعلق بسرعة الضوء في الماء . لنفترض أن سرعة الضوء في الماء أقل من سرعة الضوء في الهواء بعامل ما ، n .

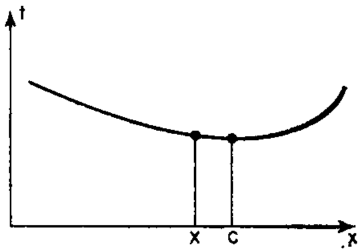
في الشكل (٢٦ – ٤)، مسألتنا هي ، مرة أخرى ، الذهاب من A إلى B في أقصر زمن . ولكي نبين أن أفضل شيء نقوم به ليس الذهاب مباشرة في خط مستقيم ، لنتخيل أن فتاة جميلة سقطت من قارب وأنها تصرخ طالبة النجدة وهي في المـــاء عند النقطة B . إن الخط المشار إليه بـ X هو الضفة . ونحن على البر عند النقطة A ، ونشهد الحادث ونستطيع أن نجري ونستطيع كذلك أن نعوم . ولكننا




الشكل (٢٦ – ٤)
توضيح مبدأ فرما من أجل الانكسار

نستطيع الجري بأسرع ممـــا نستطيع العوم . فماذا نفعل ؟ هـل نجري في خط مستقيم ؟ ( نعم ، بلا ريب ! ) ولكن لو أننا استخدمنا قدراً من الذكاء أكبر قليلاً ، إذن لتبين لنا أن من الأفضل أن نقطع على البر مسافة أطول قليلاً حتى تُنقص المسافة في الماء ، لأننا نتقدم في الماء ببطء أكثر . (وباتباع هذا النهج في المحاكمة ، يمكننا القول إن خير ما نفعله هو أن نحسب بعناية كبيرة ما ينبغي عمله ! ) على كلٍ ، لنحاول أن نبين أن الحل النهائي للمسألة هو المسار ACB ، وأن هذا المسار يتطلب زمناً أقصر من كل الأزمان الممكنة . وإذا كان هو أقصر المسارات ، فذلك يعني أننا إذا اعتبرنا أي مسارٍ آخر ، كان هذا المسار أطول منه . وهكذا ، لو أننا رسمنا الخط البياني للزمن الذي يتطلبه المسار بدلالة وضع النقطة X ، لحصلنا على منحنٍ شبيه بالذي يبينه الشكل (٢٦ – ٥) ، حيث تقابل النقطة C زمناً أقصر من كل الأزمان الممكنة .

وهذا يعني أنه إذا أزحنا النقطة X الى نقـاط ٍ قريبة من C ، فإنه ، في تقريب أول ، لا يكون هناك أي تغير يُذكر في الزمن ، ذلك لأن الميل يساوي الصفر عند قاع المنحني . إذن طريقتنا في إيجاد القانون هي أن نفترض أننـا نزيح المكان بمقـدار صغيرٍ جداً ، وأن نتطلب ألا يكون هناك أي تغير يُذكر في الزمن . (لاشك أن هناك تغيراً لانهائياً في الصغر من المرتبة الثانية ؛ فالمتوقع أن تكون هناك زيادة موجبة من أجل الانزياحات على أيٍ من جانبي C ). لذلك ، ننظر في نقطة X قريبة من C ، ونحسب المسافة المقطوعة في الذهاب من A إلى B باتباع المسارين ، ونقارن المسار الجديد بالمسار القديم . ومن السهل جداً القيام بذلك . إن ما نبغيه ، طبعاً ، هو أن يكون الفرق مساوياً الصفر تقريباً عندما تكون المسافة XC صغيرة . لننظر أولاً الى المسار على البر . إذا أقمنا عموداً XE ، نجد أن هذا المسار قصُر بالمقدار EC . لنقل أننا ، بعدم سيرنا ، نكسب هذه المسافة الاضافية . ومن جهة أخرى ، إذا أقمنا في المـاء عموداً مقابلاً CF ، نجد أن علينا أن نقطع المسافة الإضافية XF ، وأن هذا هو ما نخسره . وعليه ، فنحن ، إذا نظرنا في الأزمان ، نجد أننا نكسب الزمن الذي كان سيستغرقه قطع المسافة EC ، ولكننا نخسر الزمن الذي كان سيستغرقه قطع المسافة XF . وينبغي أن يكون هذان الزمنان متساويين ، لأنه ، في تقريبٍ أول ، ليس هناك أي تغير في الزمن . ولكن بافتراض أن السرعة في المـاء تساوي $\frac{1}{n}$ مرة السرعة في الهواء ، فإنه ينبغي أن يكون لدينا :




الشكل (٢٦ - ٥)
تقابل النقطة C الزمن الاصغر ، أما النقاط المجاورة فلها الزمن نفسه تقريباً

$$EC = n \, . \, XF \qquad (26-3)$$

نرى إذن أنـــه عندما نحصـل على النقطـة الصحيحة ، يكـون $XC \sin EXC = n \, . \, XC \sin XCF$ ، أو ، بحذف طول الوتر المشترك XC ، وملاحظة أن $EXC = ECN = \theta_i$ وأن $XCF = BCN' = \theta_r$ يكون لدينا :

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_r \qquad (26-4)$$

وهكذا نرى أنه للوصول من نقطة إلى أخرى في أصغر زمن ، عندما تكون النسبة ما بين السرعتين n ، ينبغي أن يرد الضوء بزاوية تكون قيمتها بحيث أن النسبة بين جيبي الزاويتين $\theta_i$ و $\theta_r$ تساوي النسبة بين السرعتين في الوسطين .

## ٢٦ ـــ ٤ : تطبيقات مبدأ فرما Applications of Fermat's principle

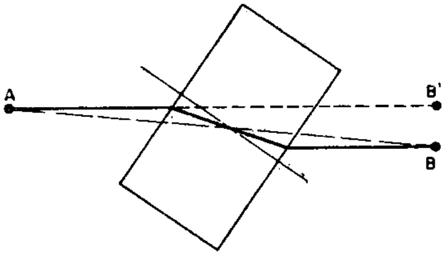
لنتأمل الآن في بعض النتائج الهامة لمبدأ الزمن الأصغر . وأولاها مبدأ التبادل* . إذا كنا وجدنا المسار ذا الزمن الأصغر في الذهاب من A إلى B ، فإن المسار الذي يستغرق أقصر زمن للسير في الاتجاه المعاكس هـــو المسار السابق نفسه ، ( هذا بافتراض أن الضوء يسير بالسرعة نفسها في أي منحى ) . وعليه إذا كان يمكن إرسال الضوء في طريقٍ مـــا ، فإنه يمكن إرساله في الطريق المعاكسة .

ومن الأمثـلة الهامـة صفيحة زجاجية ذات وجهين مستويين ومتوازيين ، جعلت بحيث تميل بزاوية ما على حزمة ضوئية . فالضوء عندما يسير من A إلى B مخترقاً صفيحة الزجاج في الشكل (٢٦-٦) لا يسير في خط مستقيم، بل إنه عوضاً

---

* يطلق عليه أيضاً « مبدأ رجوع الضوء » . ( المترجمون )

عن ذلك يُنقِص الزمن في الصفيحة بأن يجعل الزاوية فيها أقل ميلًا ، على الرغم من أنه يخسر بذلك شيئاً قليلًا في الهواء . والحزمة تنزاح فقط موازية لنفسها لأن زاويتيْ الورود والبروز متساويتان .

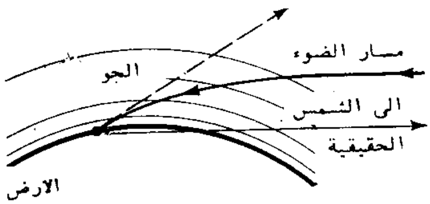



الشكل ( ٢٦ – ٦ )

حزمة ضوئية تنزاح عندما تخترق صفيحة شفافة

A beam of light is offset as it passes through a transparent bolck.

وظاهرة ثالثة مهمة هي أنه عندما نشاهد غروب الشمس ، تكون الشمس في ذلك الحين تحت الأفق ! إنها لا تبدو وكأنها تحت الأفق ، ولكنها تكون كذلك ، ( الشكل ٢٦ – ٧ ) . إن جو الأرض رقيق في الأعلى وكثيف في الأسفل . والضوء يسير في الهواء بأبطأ مما يسير في الخلاء ، لذلك فإن ضوء الشمس يمكنه أن يصل إلى نقطة S وراء الأفق بسرعة أكثر فيما إذا لم يسر في خط مستقيم وتجنّب المناطق الكثيفة ، التي يسير فيها مبطئاً ، بأن يخترقها بميل أشد . فعندما تبدو الشمس أنها تغيب تحت الأفق ، تكون في ذلك الحين تحته بكثير فعلًا . ومثال آخر على هذه الظاهرة ، السرابُ الذي غالباً ما يراه المرء وهو يقود سيارته على طرق ساخنة . فهو يرى « ماءً » على الطريق ، ولكن ما أن يبلغه حتى يجده جافاً كالصحراء ! والظاهرة هي التالية : إن ما نراه فعلًا هو ضوء السماء « المنعكس » على الطريق . فضوء السماء المتجه نحو الطريق يمكنه




الشكل (٢٦–٧)

بالقرب من الافق تكون الشمس الظاهرية أعلى من الشمس الحقيقية بنحو ½ درجة

appearent sun

true sun

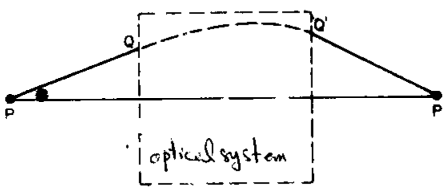
أن يصل إلى العين كما هو مبين في الشكل (٢٦-٨). لماذا ؟ إن الهواء يكون ساخناً جداً فوق الطريق مباشرة ، ولكنه يكون أبرد في الطبقات الأعلى . والهواء الأسخن يكون متمدداً أكثر من الهواء الأبرد ، ويكون بالتالي أقل كثافة ، وهذا ينقص سرعة الضوء بمقدار أقل . أي أن الضوء يسير في المنطقة الساخنة




الشكل ( ٢٦ - ٨ )
السراب
A mirage

بأسرع مما يسير في المنطقة الباردة . لذلك ، بدلاً من أن يختار الضوء اتباع الطريق المستقيمة المباشرة، فإنه يكون له أيضاً مسار بزمن أصغر ، يسير الضوء وفقه في المنطقة التي يسرع فيها لفترة ما وذلك كي يوفر الوقت . وبذلك يمكنه أن يسير وفق منحنٍ .

ومثال آخر هام على مبدأ الزمن الأصغر ، هو أن نفترض أننا نود تهيئة وضع بحيث أن كل الضوء الذي يصدر من نقطة واحدة P يتجمع كله من جديد في نقطة أخرى P′ ظاهرة في الشكل (٢٦ - ٩). وهذا يعني طبعاً أن الضوء يمكنه أن يسير في خط مستقيم من P إلى P′ . هـذا حسن جداً . ولكن كيف نستطيع أن نرتب

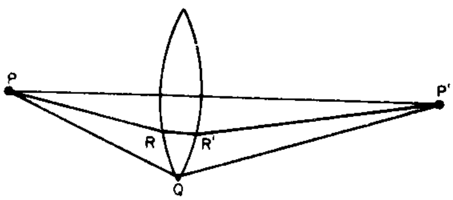



الشكل (٢٦-٩)
جملة ضوئية تفاصيلها الداخلية مجهولة
An optical "black box"

الأمر بحيث لا يقتصر سير الضوء على خط مستقيم بل بحيث يصل أيضاً إلى P′ إذا صدر من P باتجاه Q ؟ وغايتنا أن نجمّع الضوء كله فيما يسمى محرقاً . فكيف يكون ذلك ؟ إذا كان الضوء يتبع دائماً المسار ذا الزمن الأصغر ، فإنه بلا ريب لن يرضى بأن يسلك كل تلك المسارات الأخرى . والطريقة الوحيدة التي يمكن أن

نقنع بها الضوء بأن يسلك بضع مسارات مجاورة هي في أن نجعل أزمنة هـذه المسارات متساوية تماماً ! وإلا فإن الضوء يختار المسار ذا الزمن الأصغر . وعلى هـذا ، فمسألة صنع جملة مجمّعة ليست إلا تهيئة أداة يستغرق فيها الضوء الزمن نفسه عندما يسلك كل المسارات المختلفة !

وهذا أمر يسهل القيام به . لنفترض أن لدينا قطعة زجاجية يسير فيها الضوء بأبطأ مما يسير في الهواء كما في الشكل (٢٦–١٠) . لنتأمل الآن في شعاع يسير في الهواء وفق المسار PQP′ ، وهو أطول من المسار المباشر من P إلى P′ ويستغرق بلا ريب زمناً أطول . ولكن لو أننا أدخلنا قطعة زجاجية ثخنها الثخن المطلوب تماماً ( وسوف نحسب فيما بعد كم ينبغي أن يكون الثخن ) ، فإنه قد يمكنها أن تعوّض تماماً الزمن الإضافي الذي كان يستغرقه الضوء لدى سيره مائلاً ! ويمكننا في هذه الظروف أن نرتب الأمر بحيث أن الزمن ، الذي يستغرقه الضوء في سيره المستقيم مخترقاً الزجاجة ، يساوي الزمن الذي يستغرقه في المسار PQP′ . وبالمثل ، إذا اعتبرنا شعاعاً PRR′P′ مائلاً ميلاً جزئياً ، فإنه لا يكون بطول المسار PQP′ بل أقصر منه ، ولا نحتاج إلى تعويض كالتعويض في حالة المسار المستقيم ، ولكننا نحتاج إلى بعض التعويض . ونتوصل أخيراً إلى قطعة زجاجية كالتي تظهر في الشكل (٢٦ – ١٠) . فبواسطة هذه القطعة ، يتجمع كل الضوء الذي يصدر من P في P′ . وهذا أمر نعرفه حق المعرفة طبعاً ، ونسمي مثل هذه الأداة عدسة مقربة وسوف نحسب فعلاً في الفصل التالي الشكل الذي ينبغي أن تتخذه العدسة حتى تجمّع الضوء تجميعاً كاملاً .

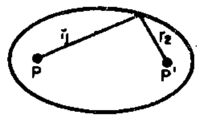



الشكل ( ٢٦ – ١٠ )

جملة ضوئية مجمعة

A focusing optical system

لنأخذ مثالاً آخر : نفترض أننا نود تهيئة بعض المرايا بحيث أن الضوء الصادر من P يسير دائماً الى P′ كما في الشكل (٢٦–١١) . وفي كل مسار، يسير الضوء أولاً إلى المرآة ثم يرتد عنها ، وينبغي أن تكون كل الأزمان متساوية . هنا يسير الضوء دائماً في الهواء ، بحيث يكون الزمن والمسافة متناسبين . إذن فالقول بأن الأزمان واحدة، هو كالقول بأن المسافة الكلية واحدة . وعليه فإن مجموع المسافتين $r_1$ و $r_2$ ينبغي أن يكون مقداراً ثابتاً . إن القطع الناقص هو المنحني الذي يتصف بأن مجموع بعدي أي نقطة عليه عن نقطتين معينتين يساوي مقداراً ثابتاً* ،وهكذا يمكننا التأكد من أن الضوء الصادر من أحد المحرقين يتجمع كله في المحرق الآخر .



الشكل (٢٦ – ١١)
مرآة ناقصة
An ellipsoidal mirror .

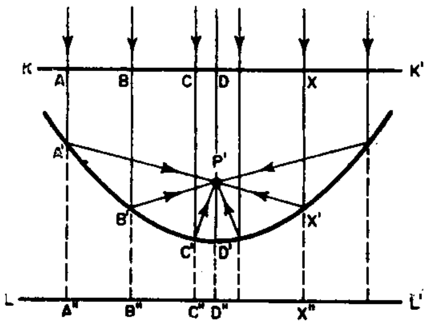
ويستخدم المبدأ نفسه في تجميع ضوء النجوم . فراصدة بالومار Palomar العظيمة ، التي يبلغ قطرها ( 200 ) انش ، أُنشئت على المبدأ التالي . تصوّر نجماً على بعد مليارات من الأميال ؛ ونود أن نجمّع كل الضوء الصادر منه في محرق . إننا لا نستطيع طبعاً أن نرسم الأشعة التي تقطع الطريق كله حتى النجم ، ولكننا نريد مع ذلك أن نتحقق من أن الأزمان متساوية . نحن نعرف ، دون شك ، أن الأشعة المختلفة عندما تصل إلى مستوٍ ما KK′ ، عمودي على الأشعة ، تكون كل الأزمان متساوية في هذا المستوي ،انظر الشكل (٢٦–١٢). وينبغي بعدئذ أن تسقط الأشعة على المرآة ثم تتجه نحو P′ في أزمان متساوية. أي أن علينا أن نجد منحنياً يتصف بأن مجموع المسافتين XX′+X′P′ ثابت كيفما اختيرت X.

---

* وبناء على ذلك تصنع المرآة الناقصية من سطح عاكس هو جزء من سطح قطع ناقص مجسم دوراني محرقاه هما محرقا المرآة الناقصية .

( المترجمون )

والطريقة السهلة لإيجاد هذا المنحني هي في أن نمدد طول الخط $XX'$ حتى مستوٍ $LL'$ . فإذا رتبنا الآن أمر منحنينا بحيث أن $A'A'' = A'P'$ و $B'B'' = B'P'$ و $C'C'' = C'P'$ وهكذا دواليك ، فإننا نحصل على منحنينا المنشود ؛ إذ حينئذ يكون $AA' + A'P' = AA' + A'A''$ مقداراً ثابتاً بلا ريب . فمنحنينا إذن هو المحل الهندسي لكل النقاط المتساوية البعد عن خطٍ وعن نقطة . مثل هذا المنحني يسمى قطعاً مكافئاً ؛ فالمرآة تُصنع على شكل قطع مكافىء * .




الشكل (٢٦-١٢)

مرآة مكافئية

A paraboloidal mirror

إن الأمثلة السابقة توضح المبدأ الذي تصمَّم على أساسٍ منه مثل تلك الأدوات الضوئية . ويمكن حساب المنحنيات المضبوطة باستعمال المبدأ القائل أنه كي يكون التجميع كاملاً ، ينبغي أن تكون أزمان المسارات من أجل كل الأشعة الضوئية متساوية تماماً، كما ينبغي أن تكون أصغر من زمن أي مسار مجاور .

وسوف نناقش هذه الأدوات الضوئية المجمّعة بتفصيل أكثر في الفصل التالي؛ ولنمضِ الآن في مناقشة تطور النظرية . عندما يظهر مبدأ نظري جديد، كمبدأ الزمن الأصغر ، فإن أول رغبة قد تراودنا هي أن نقول ، « حسناً هذا جميل جداً ؛ هذا مبهج جداً ؛ ولكن السؤال هو ؛ هل يساعد المبدأ بأية حال في فهم الفيزياء ? » وقد يقول قائل « أجل ، أنظر كم من الأشياء نستطيع أن نتفهمها الآن ! » ويقول آخر ، « حسناً ، ولكني أستطيع أن أفهم المرايا أيضاً .

* أي أن سطحها العاكس جزء من سطح مجسم قطع مكافىء دوراني .
(المترجمون)

إنني أحتاج إلى منحنٍ بحيث أن كل مستوٍ مماسٍ له يصنع زاويتين متساويتين مع الشعاعين . إنني أستطيع أن أحسب العدسة أيضاً ، لأن كل شعاع يرد عليها ينحرف خلالها بزاوية تُعطى بقانون سنيل . » ومن الجلي أن القول بالزمن الأصغر ، والقول بأن الزاويتين متساويتان عند الانعكاس ، وأن جيبيْ الزاويتين متناسبان عند الانكسار ، شيء واحد . فهل المسألة إذن مجرد مسألة فلسفية أو مسألة جمالية ؟ إن من الممكن أن يكون لكلٍ من الجانبين حججه .

وعلى كلٍ ، فإن أهمية المبدأ القوي تكمن في أنه يتنبأ بأشياء جديدة .

إن من السهل بيان أن هناك عدداً من الأشياء الجديدة تنبأ بها مبدأ فرما . لنفترض أولاً أن لدينا ثلاثة أوساط ، زجاج وماء وهواء ، وأننا نجري تجربة انكسار ، ونقيس القرينة $n$ لوسطٍ بالنسبة لوسطٍ آخر . لنسمِّ $n_{12}$ قرينة الهواء (1) بالنسبة للماء (2) ؛ و $n_{13}$ قرينة الهواء (1) بالنسبة للزجاج (3) . فإذا قسنا قرينة الماء بالنسبة للزجاج ، فينبغي أن نجد قرينة أخرى نسميها $n_{23}$ . ولكن ليس هناك سبب مسبق يدعو لأن تكون هناك أي علاقة بين $n'_{12}$ و $n_{13}$ و $n_{23}$ . إلا أن فكرة الزمن الأصغر تقضي ، من جهة أخرى ، أن تكون هناك علاقة معينة بين هذه المقادير . فالقرينة $n_{12}$ هي النسبة ما بين شيئين ، هما سرعة الضوء في الهواء وسرعته في الماء ؛ و $n_{13}$ هي نسبة السرعة في الهواء إلى السرعة في الزجاج ؛ و $n_{23}$ هي نسبة السرعة في الماء إلى السرعة في الزجاج . لذلك نختصر السرعة في الهواء ونحصل على :

$$n_{23} = \frac{v_2}{v_3} = \frac{v_1/v_3}{v_1/v_2} = \frac{n_{13}}{n_{12}} \qquad (26\text{-}5)$$

وبعبارة أخرى ، نتنبأ بأن القرينة من أجل زوجين جديدين من المواد يمكن الحصول عليها من قرينتيْ المادتين كلٍ على حدة ، كلتيهما بالنسبة إلى الهواء أو بالنسبة إلى الخلاء . وبناء على ذلك ، إذا قسنا سرعة الضوء في كل المواد ،

وحصلنا من ذلك على عددٍ واحد لكل مادة ، أي على قرينتها بالنسبة إلى الخلاء ، ولنسمها $n_i$ ( $n_1$ هي نسبة السرعة في الهواء إلى السرعة في الخلاء ، إلخ . ) ، فإن صيغتنا تكون حينئذ بسيطة . فالقرينة من أجل أي مادتين i و j تساوي :

$$n_{ij} = \frac{v_i}{v_j} = \frac{n_j}{n_i} \qquad (26 \cdot 6)$$

وإذا استُخدم قانون سنِل وحده ، فإنه لا يكون هناك أساس لتنبؤٍ من هذا النوع* . ولكن هذا التنبؤ صحيح طبعاً . وقد عُرفت العلاقة (5 - 26) منذ أمدٍ بعيد ، وكانت حجة دامغة في صالح مبدأ الزمن الأصغر .

والحجة الأخرى في صالح مبدأ الزمن الأصغر هي تنبؤ آخر يقضي بأننا إذا قسنا سرعة الضوء في الماء ، وجدنا أنها أقل من سرعته في الهواء . وهذا تنبؤ من نوع مختلف تمام الاختلاف ، وهو تنبؤ باهر ، لأن كل ما قسناه حتى الآن كان زوايا فقط ؛ وبين أيدينا الآن تنبؤ نظري يختلف تماماً عن المشاهدات التي استنتج منها فرما فكرة الزمن الأصغر . وتدل التجربة على أن السرعة في الماء هي في الواقع أبطأ من السرعة في الهواء ، تماماً بالنسبة اللازمة للحصول على القرينة الصحيحة للماء !.

## ٢٦ ـــ ٥ : نص أدق لمبدأ فرما

A more precise statement of Fermat's principle.

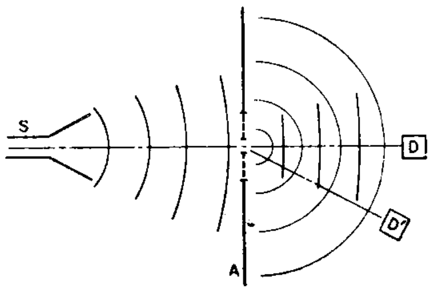
ينبغي علينا ، في الواقع ، أن نصوغ مبدأ الزمن الأصغر صياغة أكثر دقة بقليل . فالنص عليه في ما سبق لم يكن مضبوطاً . وقد سمي خطأً مبـــدأ

* بالرغم من أنه يمكن استنتاج هذا التنبؤ فيما إذا افتُرض افتراض آخر وهو أن إضافة طبقة من مادة ما إلى سطح مادة أخرى لا يغير من زاوية الانكسار النهائية في المادة الاخيرة .

الزمن الأصغر ، وقد استرسلنا مع الوصف الخاطىء لملاءمته ، ولكن ينبغي علينا الآن أن نرى ما هو النص الصحيح . لنفترض أن لدينا مرآة كالتي في الشكل(٢٦ - ٣). ما الذي يجعل الضوء يفكر بأن عليه أن يسير إلى المرآة ؟ إن المسار ذا الزمن الأصغر هو AB وضوحاً . وهكذا ، قد يقول بعض الناس ، « إن الزمن يكون أحياناً زمناً أعظم » ولكنه ليس زمناً أعظم ، لأن المسار المنحني يستغرق بالتأكيد زمناً أطول ! فالنص المضبوط هو التالي : إن الشعاع السائر في مسار خاص ما يتصف بأنه إذا أحدثنا فيه تغيراً صغيراً ( انزياحاً قدره واحد في المائة مثلاً ) ، بأي وسيلة كانت ، وليكن في الموضع الذي يسقط فيه على المرآة ، أو في شكل المنحني ، أو في أي شيء آخر ، فإنه لا يكون هناك تغير من المرتبة الأولى في الزمن ، بل تغير من المرتبة الثانية فحسب . وبعبارة أخرى ، المبدأ هو أن الضوء يسلك مساراً بحيث تكون هناك مسارات أخرى مجاورة تستغرق الزمن نفسه بالضبط تقريباً .

وما يلي هو صعوبة أخرى تجابهنا مع مبدأ الزمن الأصغر ، وهي صعوبة لا يمكن أن يتحملها إطلاقاً من لا يعجبه هذا النوع من النظريات . يمكننا بواسطة نظرية سنل أن « نفهم » الضوء . فالضوء يسير قُدماً ويرى سطحاً فينعطف عنده لأنه يقوم بشيء ما عند السطح . إن فكرة السببية في أن الضوء يسير من نقطة إلى نقطة ثم إلى نقطة أخرى وهلم جرا ، هي فكرة سهلة الفهم . ولكن مبدأ الزمن الأصغر مختلف تمام الاختلاف ، إنه مبدأ فلسفي في الطريقة التي تعمل بها الطبيعة . فبدلاً من أن يقول إن الأمر سببي ، أي أننا عندما نفعل شيئاً يحدث شيء آخر وما إلى ذلك ، فإنه يقول ما يلي : نحن نعدّ الوضع ، والضوء يقرِّر أيُّ الأزمان هو الأقصر أو الأطول وهو الذي يختار مساره . ولكن ماذا يفعل ، وكيف يجد ذلك ؟ هل هو يستشم المسارات القريبة ويقارن ما بينها ؟ والجواب على ذلك أجل ، إنه يفعل ذلك بطريقة ما .

وهذه هي الميزة البارزة غير المعروفة ، طبعاً ، في الضوء الهندسي والتي تدخل في فكرة طول الموجة ؛ فطول الموجة يُنبئنا بالتقريب على أي بعدٍ ينبغي أن « يستشم » الضوءُ المسارَ حتى يتحقق منه . ومن الصعب إثبات هذا الأمر في الضوء على نطاق واسع ، لأن الأطوال الموجية قصيرة قصراً مفرطاً . ولكن باستعمال الأمواج الراديوية ، كالأمواج ذات الطول 3 cm مثلاً ، تكون الأبعاد التي تختبرها الأمواج الراديوية أكبر . فإذا كان لدينا منبع للأمواج الراديوية وكاشف وشق كما هو مبين في الشكل (٢٦ - ١٣) ، فإن الأشعة تسير طبعاً من S إلى D لأن هذا المسار خط مستقيم ، وإذا ضيّقنا الشق فلا بأس في ذلك ، فإن الأشعة تستمر في سيرها ، ولكن إذا أزحنا الكاشف جانباً إلى ′D ، فإن الأمواج لا تسير من خلال الشق العريض من S إلى ′D ، لأنها تختبر بضعة مسارات مجاورة وتقول « لا ، ياصديقي ، هذه المسارات كلها تقابل أزماناً مختلفة » ومن جهة أخرى ، إذا نحن منعنا الإشعاع من أن يختبر المسارات بتضييق الشق إلى أقصى مدى ، لا يبقى هناك إلا مسار واحد متيسر ، فيسلكه الإشعاع ! إذن حين يكون الشق ضيقاً ، يصل إلى الكاشف ′D من الإشعاع أكثر مما يصل إليه عندما يكون الشق عريضاً !



الشكل (٢٦ - ١٣)
مرور الامواج الراديوية من خلال شق ضيق

ويمكن للمرء أن يفعل الشيء نفسه مع الضوء ؛ ولكن من الصعب إظهار ذلك على نطاق واسع . ويمكن رؤية هذا الأثر في ظل الشروط البسيطة التالية .

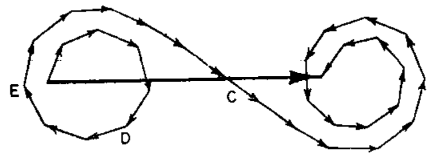
خذ ضوءاً ساطعاً صغيراً ، مثلاً مصباحُ زجاجه شفاف من المصابيح البعيدة في شارع منار ، أو انعكاس ضوء الشمس على مصدّ سيارة محدب . ثم اجعل اصبعين أمام إحدى عينيك ، وانظر من خلال الفرجة الضيقة بينهما وضيّق على الضوء بلطفٍ شديد ، تجد أن خيال الضوء الذي كان من قبل ذلك نقطة صغيرة قد استطال إلى حدٍ بعيد ؛ وقد يمتد فيصبح خطاً طويلاً . وتفسير ذلك هو أن الأصبعين متقاربتان تقارباً شديداً ، والضوء الذي يُفترض أن يبرز من بينهما في خط مستقيم ، يبرز منتشراً في زاوية ، بحيث أنه عندما يصل إلى العين يصل إليها من عدة اتجاهات . ويمكنك إذا كنت شديد الانتباه ، أن تلاحظ نهايات عظمى جانبية ، وعدداً من الأهداب أيضاً موازية للحرفين ، أضف إلى ذلك أن الشيء كله يكون ملوّناً . وسنشرح هذا كله في الوقت المناسب ، ولكنه في الوقت الحاضر برهان على ان الضوء لا يسير دائماً في خطوط مستقيمة ، وهو برهان من السهل جداً إجراؤه .

## ٢٦ ــ ٦ : كيف يتم الأمر ؟ How it works

واخيراً ، نعطي فكرة غير دقيقة ابداً عما يحدث فعلاً ، وكيف يتم الأمر كله في الواقع ، وذلك اعتماداً على ما نعتقد الآن أنه وجهة النظر الصحيحة المتفقة مع الميكانيك الكوانتي ، ولكن طبعاً بشرحٍ كيفي فقط . إذا تتبعنا الضوء من A إلى B في الشكل (٢٦ ــ ٣) ، نجد ان الضوء لا يبدو أنه في شكل الأمواج إطلاقاً . وبدلاً من ذلك تبدو الأشعة كأنها مكوّنة من فوتونات ، وهي تُحدِث بالفعل طقطقات في عدّاد فوتوني إذا استعملنا واحداً . إن سطوع الضوء يتناسب مع متوسط عدد الفوتونات التي ترد في ثانية واحدة ، وما نحسبه هو احتمال وصول فوتونٍ من A إلى B ، بصدمه المرآة مثلاً . والقانون من أجل هذا الاحتمال هو القانون التالي الغريب جداً . خذ أي مسار

وأوجد الزمن من أجله ؛ ثم كوّن عدداً عقدياً أو ارسم متجهاً عقدياً صغيراً $pe^{i\theta}$ ، تكون زاويته θ متناسبة مع الزمن . إن عدد الدورات في الثانية يساوي تواتر الضوء . خذ الآن مساراً آخر ؛ يكون زمنه مختلفاً ، مثلاً ، بحيث أن المتجهة الخاصة به تدور بزاوية مختلفة - حيث تتناسب الزاوية دائماً مع الزمن . خذ كل المسارات المتيسرة وأضف إلى كلٍ منهـا متجهة صغيرة ؛ فيكون الجواب حينئذ أن احتمال وصول الفوتون يتناسب مع مربع طول المتجهة الأخيرة ، من البداية حتى النهاية !

لنبين الآن كيف ينطبق هذا على مبدأ الزمن الأصغر من أجـل المرآة . ننظر في كل الأشعة وكل المسارات الممكنة ADB و AEB و ACB ، الخ . . . في الشكل (٢٦ - ٣) . إن المسار ADB يسهم إسهاماً صغيراً ، ولكن المسار التالي AEB يستغرق زمناً مختلفاً تماماً ، لذلك تكون زاويته θ مختلفة تماماً . لنقل إن النقطة C تقابل الزمن الاصغر ، حيث إذا غيرنا المسارات لا تتغير الأزمان . إذن فالأزمان تتغير لفترةٍ ما ، ثم تبدأ بالتغير أقل فأقل كلما اقتربنا من النقطة C كما في الشكل(٢٦ - ١٤) . وعليه فالاسهم التي ينبغي علينا اضافتها تصنع الزاوية نفسها تقريباً قرب النقطة C ، وذلك لفترة زمنية وجيزة ، ثم يشـرع الزمن بالازدياد تدريجيـاً وتتجـه الاطـوار بالاتجاه الآخر وهكذا . وتكون لدينـا أخيراً عقدة مشدودة . والاحتمال الكلي هو مربع المسافة من طرف إلى الطرف الآخر . وتكاد كل تلك الاحتمالات المتراكمة تحدث في المنطقة




الشكل ( ٢٦ - ١٤ )

جمع سعات الاحتمال من أجل عدة مسارات متجاورة

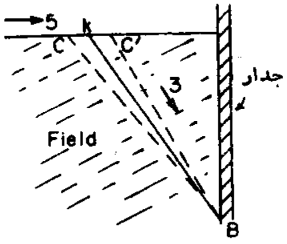
التي يكون فيها منحى كل الأسهم واحداً ( أي يكون طورها واحداً ) .

وكل الاسهامات من قبل المسارات ، التي تكون أزمنتها مختلفة جداً عند تغيير المسار ، يُفني بعضها بعضاً باتجاهها في مناح مختلفة . لذلك ، إذا حجبنا الأجزاء القصوى من المرآة ، فإنها تظل تعكس العكس نفسه بالضبط تقريباً ، لأن كل ما فعلناه هو إزالة قطعة من المخطط داخل نهايتي الحلزون ، وهذا لا يُحدث إلا تغييراً ضئيلاً جداً في الضوء وهكذا فهذه هي العلاقة بين الصورة الأساسية للفوتونات ، التي يتوقف احتمال وصولها على تراكم الأسهم ، وبين مبدأ الزمن الأصغر .

❋ ❋ ❋

## مسائل وتمارين

٢٦ – ١ : يستطيع رجل أن يسير بسرعة 5 ft/s على الرصيف ، في حين تكون سرعته 3 ft/s فقط في حقل ذي خشونة منتظمة . ويبدأ الرجل من النقطة A ، الواقعه على بعد 140 ft من جدار ، ويسير في اتجاه النقطة B ، الواقعة على بعد 120 ft جنوب الرصيف وعلى امتداد الجدار . انظر إلى الشكل ( ٢٦ - ١٥ ) .




الشكل ( ٢٦ – ١٥ )

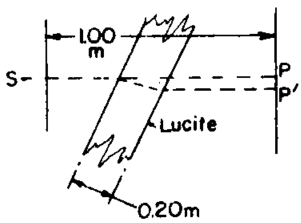
(أ) ماهي الطريق AKB التي ينبغي أن يسلكها الرجل لينجز ذلك في أقصر وقت ممكن ؟

( لاحظ أنه يحق لك أن تفرض أن «قانون الانكسار» ينطبق على هذه المسألة . ولكن يمكنك أن تحلها بدون فرضية كهذه إذا كانت لديك الشجاعة الكافية ! )

(ب) ما مقدار هذا الوقت الأصغر ؟

(حـ) ما مقدار الوقت الذي تستغرقه الطريقان الأخريان ACB و AC′B إذا كان CK = KC′ = 10 ft ؟

٢٦ – ٢ : يصدر ضوء ، من منبع S ، في شكل حزمه ضيقة عمودية على شاشة تبعد 1.0 m عـــن المنبع . ويسقط شـعاع الضوء على الشاشة عند P . ثم تدخل صفيحـة من اللوسـايت ، ثخنهـا 0.20 m وقـرينـة انكسارهـا 1.50 ، بحيث



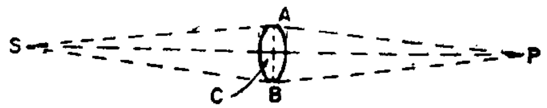

الشكل( ٢٦ – ١٦ )

تسقط الحزمة عليهـا بزاوية ورود قدرها 30° . انظر الى الشكل (٢٦-١٦) .

(أ) أوجد الانزياح الجانبي ، PP′ ، للشعاع ؛

(ب) أوجد الزيادة المئوية في الزمن، اللازم لقطع المسار SP′ ، بالنسبة الى الزمن اللازم لقطع المسار الأصلي ، SP ، في الهواء .

٢٦ – ٣ : يبين الشكل (٢٦–١٧) منبعاً ضوئياً S ، وخياله P الذي تشكله




الشكل (٢٦–١٧)

عدسة . ولدينا SC = CP = 1.00 m ، AC = BC = 0.10 m . ويساوي ثخن العدسة ACB عند طرفها 3 mm . فاذا أردنا أن يستغرق الشعاع الضوئي SCP الوقت نفسه الذي يستغرقه الشعاعان الضوئيان SAP و SBP ، فكم يجب أن يكون ثخن العدسة عند C ؟ ( افرض ان قرينة انكسار الزجاج تساوي 1.60 ) .

٢٦ – ٤ : عندما نقف أمام مرآة مستوية عادية، فإن خيالنا يظهر معكوساً، اذ نرى اليمين يساراً واليسار يميناً ؛ فيبدو خيال يدنا اليمنى ، وكأنه اليد اليسرى « للشخص » الواقع في المرآة . لماذا لا تعكس المرآة القمة فتجعلها قاعاً ؟ وما الذي ينعكس بفعل المرآة ؟

٣٦ – ٥ : مرآتان مستويتان متقاطعتان تشكلان بينهما زاوية قائمة داخلية تامة ، ويكون خط تقاطعهما شاقولياً . بين لماذا نرى أنفسنا ، في مثل هذه المرآة ، « كما يرانا الآخرون » . ( أي نرى اليمين يميناً واليسار يساراً ) .

٢٦ – ٦ : تتعامد ثلاث مرايا متقاطعة مثنى مثنى ، فتتشكل منها زاوية مجسمة داخلية ذات وجوه متعامدة . ويسقط شعاع من الضوء على إحدى المرايا، ومن ثم على مرآة واحدة من المرآتين الأخريين أو على كلتيهما. بيّن أنه بعد أن تكون كل الانعكاسات قد تمت ، ( وبفرض أن المرايا واسعة الامتداد ) فإن الشعاع ينتقل بصورة معاكسة تماماً لاتجاهه الأصلي ، ولكنه ينزاح جانبياً . هل تعلم تطبيقاً عملياً لمثل هذا « العاكس الركني » ؟

٢٦ – ٧ : من المعلوم أن الضوء عندما يذهب من وسط شفاف إلى وسط شفاف آخر ، فإنه لا ينكسر كله ، بل ينعكس بعضه ، وقد يمتص جزء ضئيل منه أو يتبعثر . فما الذي يحدث عندما تسقط حزمة من الضوء على السطح الفاصل بين وسطين ، إذا كانت الحزمة الضوئية قادمة من الوسط الأكثر كثافة وهي تصنع زاوية كبيرة مع الناظم على السطح الفاصل ؟

* * *

# الفصل السابع والعشرون

Geometrical optics

# الضوء الهندسي

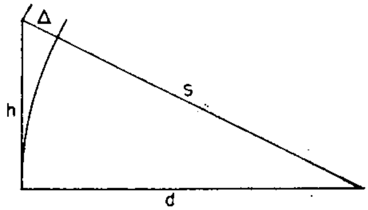
## ٢٧ ـــ ١ : مقدمة

سوف نناقش في هــذا الفصل بعض التطبيقات الأولية الأفكار الواردة في الفصل السابق على عــدد من الأدوات العلميــة ، باستعمال التقريب المسمى الضوء الهنــدسي . وهو تقريب مفيد جداً في التصميم العملي لكثير من الجمل والآلات البصرية . والضوء الهندسي إما أن يكون بسيطاً جداً أو معقداً جداً . ونعني بذلك أنه يمكننا إما أن ندرسه دراسة سطحية فقط بحيث نستطيع تصميم الآلات تصميماً أولياً باستعمال قواعد هي من السهولة بحيث نكاد لا نحتاج إلى معالجتها هنا إطلاقاً ، لأنها عملياً من مستوى المدرسة الثانوية ؛ واما أن يصبح الموضوع ، إذا رغبنا في معرفة الأخطاء الصغيرة في العدسات ومثل ذلك من التفاصيل ، موضوعاً يصل الى درجة من التعقيد بحيث لا يمكن مناقشته هنا لأنه من الدراسات العليا ! وإذا كان لدى أحـــدنا مسألة فعلية ومفصلة في تصميم العدسات ، بما في ذلك تحليل الزيوغ ، فإنه يُوصى حينئذ بأن يقرأ عن هــذا الموضوع ، أو أن يكتفي برسم الأشعة خــلال السطوح المختلفة ( وهو ما يبين الكتاب كيفية القيام به ) ، مستخدماً قانون الانكسار من جانب إلى الجانب الآخر ، وبالبحث عن الأشعة البارزة ورؤية ما إذا كانت تشكل خيالاً مرضياً .

وقد قال بعضهم أن هذا عمل مضنٍ جداً ، ولكنه اليومَ الطريقُ الصحيح للقيام بذلك ، بفضل الآلات الحاسبة . إذ يمكن للمرء أن يُعدّ المسألة وأن يُجري الحساب بسهولة زائدة من أجل شعاعٍ تلو آخر . فالموضوع أصبح في النهاية بسيطاً جداً حقاً ولا يتضمن مبادىء جديدة . أضف إلى ذلك ، أنه يتبين أن قواعد أيٍ من البصريات الأولية أو العالية ، نادراً ما تكون مميزةً لحقول أخرى، لذلك ليس هناك من داعٍ خاص لتتبع الموضوع إلى مدى بعيد ،وذلك باستثناء أمر هام واحد .

إن نظرية الضوء الهندسي الأكثر تقدماً وتجريداً هي التي وضعها هَمِلْتُن Hamilton ، ويتبين أن لهذه النظرية تطبيقاتٍ هامة جداً في الميكانيك . بل إنها ، في الواقع ، أكثر أهمية في الميكانيك منها في الضوء ، لذلك نترك نظرية هَمِلتُن لموضوع الميكانيك التحليلي المتقدم الذي يُدرس في الدراسات الجامعية العليا أو في سنة التخرج . أما وقد أدركنا أن الضوء الهندسي لا يخدم فروع الفيزياء الأخرى إلا قليلاً جداً ، باستثناء ما هو لأغراضه الخاصة ، فإننا نمضي إلى مناقشة الخواص الأولية للجمل الضوئية البسيطة على أساسٍ من المبادىء التي ذكرناها في الفصل الأخير .

ولكي نمضي في ذلك ، ينبغي ان تكون لدينا صيغة هندسية ، هي الصيغة التالية: إذا كان لدينا مثلث ذو ارتفاع صغير h وقاعدة طويلة d ، فإن الوتر s ( الذي نحتاجه لإيجاد الفارق الزمني بين طريقين مختلفين ) يكون أطول من القاعدة كما في الشكل ( ٢٧ – ١ ) .وبكم هو أطول منها؟



الشكل ( ٢٧ – ١ )

يمكن إيجاد الفرق $\Delta = s-d$ بعدة طرائق ، إحداها هي التالية : نلاحظ أن

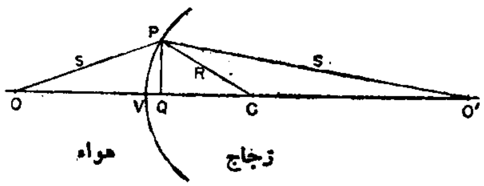
$s^2 - d^2 = h^2$ ، أو $(s-d)(s+d) = h^2$ . ولكن $s-d = \Delta$ ، و $s+d \sim 2s$ .
إذن :

$$\Delta \sim h^2/2s \qquad (27-1)$$

وهذه هي كل الهندسة التي نحتاج إليها لمناقشة تكوّن الأخيلة بالسطوح المنحنية !

## ٢٧ — ٢ : البعد المحرقي لسطح كروي the focal length of spherical surface

إن أول حالة نناقشها ، وأبسطها ، هي حالة سطح كاسر وحيد ، يفصل بين وسطين مختلفين في قرينة الانكسار كما في الشكل (٢٧ - ٢). ونترك للطالب دراسة الحالة التي تكون فيها قرينتا الانكسار كيفيتين ، لأن الأفكار ، لا الوضع الخاص ، هي أهم شيء دائماً ، والمسألة سهلة الحل سهولة كافية على أي حال . وعليه ، لنفترض أن السرعة على اليسار تساوي 1 ، وأنها على اليمين تساوي 1/n ، حيث n : قرينة الانكسار . إن سير الضوء في الزجاج أبطأ من سيره في الهواء بعامل n .




الشكل ( ٢٧ - ٢ ) Focusing by a single refracting surface
التحكيم بسطح كاسر وحيد

نفترض الآن أن لدينا نقطة عند O ، على بعد S من سطح الزجاج الأمامي ، ونقطة أخرى O′ على بعد S′ داخل الزجاج ، وإننا نود أن نرتب السطح المنحني بحيث أن كل شعاع مار من O ، ساقط على السطح في أية نقطة منه P ينحرف بحيث يتجه في سيره نحو النقطـــة O′ . ولكي يتحقق ذلك ، علينا أن نعطي السطح شكلاً بحيث أن الزمن الذي يستغرقه الضوء في السير من O

إلى P ، أي المسافة OP مقسومة على سرعة الضوء ( والسرعة هنا تساوي الواحد ) ، إذا أضيف اليه الزمن الذي يستغرقه في السير من P إلى ′O ، أي n.O′P ، كان مجموع هذين الزمنين مساوياً مقداراً ثابتاً لا يتوقف على موضع النقطة P . وهذا الشرط يزوّدنا بمعادلة لتعيين السطح . والجواب هو أن هذا السطح سطح منحنٍ معقد جداً من منحنيات الدرجة الرابعة ،ويمكن للطالب أن يتسلى بمحاولة حسابه بواسطة الهندسة التحليلية . ومن الأسهل تجريب حالة خاصة تقابل $s \to \infty$ ، إذ يكون المنحني حينئذ منحنياً من الدرجـــة الثانية يسهل التعرّف عليه . ومن الممتع مقارنة هـذا المنحني بالمنحني المكافئ الذي وجدناه لمرآة مجمّعة للضوء الذي يصل إليها من اللانهاية .

وعلى هذا فالسطح المضبوط لا يمكن صنعه بسهولة ـ فتجميع الضوء ،الوارد من نقطة ، في نقطة أخرى ، يتطلب في الواقع سطحاً معقداً . وينتهي الأمر عملياً إلى أننا لا نحاول عادة صنع مثل هذه السطوح المعقدة ، بل نتّبع بدلاً من ذلك حلّا وسطاً . فعوضاً عن أن نحاول تجميع كل الأشعة في محرقٍ ما ، نرتب الأمر بحيث أن الأشعة القريبة جداً من المحور ′OO وحدها هي التي تتجمع في محرق. أما الأشعة البعيدة فيمكنها أن تشذ عن ذلك إذا شاءت ، لسوء الحظ ، وذلك لأن السطح المثالي سطح معقد ، ونستعمل عوضاً عنه سطحاً كروياً بالانحناء المضبوط عند المحور . إن صنع كرة أسهل بكثير من صنع سطوحٍ أخرى ، بحيث أن من المفيد لنا أن نبحث عما يحدث للأشعة عندما تسقط على سطح كروي ، بافتراض أن الأشعة القريبة من المحور هي وحدها التي يُراد تجميعها في محرق على نحوٍ كامل . هذه الأشعة القريبة من المحور تسمى أحياناً الأشعة المحورية ، وما نحن في سبيل تحليله هو شروط تجميع الأشعة المحورية . وسوف نناقش فيما بعد الأخطاء الناجمة عن كون الأشعة ليست دائماً قريبة من المحور .

وهكذا، بافتراض أن P قريبة من المحور، نُسقط عموداً PQ على المحور بحيث أن الارتفاع PQ يساوي h . لنتصور لحظةً أن السطحَ سطح مستوٍ مار من P . ففي هذه الحالة يفوق الزمنُ اللازم للسير من O إلى P الزمنَ من O إلى Q ، وكذلك فإن الزمن من P إلى 'O يفوق الزمن من Q إلى 'O . ولهذا السبب ينبغي أن يكون الزجاج منحنياً ، لأن الزيادة الكلية في الزمن ينبغي أن يُعوَّض عنها بالتأخر في الانتقال من V إلى Q ! إلا أن الزيادة في الزمن وفق الطريق OP تساوي $h^2/2s$ ، والزيادة في الزمن على الطريق الأخرى تساوي $nh^2/2s'$ . وهذه الزيادة في الزمن ، التي ينبغي أن تساوي التأخر في السير وفق VQ ، تختلف عما يمكن أن تكون عليه في الخلاء ، لأن هناك وسطاً قائماً. وبعبارة أخرى ، ليس الزمن في السير من V إلى Q كما لو كان مباشرة في الهواء بل هو أقل بالعامل n ، بحيث أن زيادة التأخر في خلال هذه المسافة تساوي حينئذ VQ $(n - 1)$ . والآن ، ما هو طول VQ ؟ إذا كانت النقطة C مركز الكرة ، وكان نصف قطرها R ، فإننا نرى باستعمال الصيغة نفسها أن المسافة VQ تساوي $h^2/2R$ . وبناء على ذلك نكتشف أن القانون الذي يربط ما بين المسافتين s و 's والذي يعطينا نصف قطر الانحناء R للسطح الذي نطلبه هو :

$$(h^2/2s) + (nh^2/2s') = (n - 1)\, h^2/2R \qquad (27\text{–}2)$$

أو :

$$\frac{1}{s} + \frac{n}{s'} = \frac{n - 1}{R} \qquad (27\text{–}3)$$

فإذا كان لدينا وضع O ووضع آخر 'O ، وأردنا أن نجمِّع الضوء الوارد من O في 'O ، فإنه يمكننا حينئذ أن نحسب نصف قطر الإنحناء R للسطح المطلوب بواسطة هذه الصيغة .

والآن ، ينتج أمر على قدر من الأهمية وهو أن العدسة نفسها بنصف قطر الانحناء نفسه ، يمكنها تجميع الضوء من أجل مسافات أخرى ، أي من أجل أيٍّ زوجين من المسافات اللذين يكون مجموع مقلوبها ، بعد ضرب أحدهما بـ n ، يساوي مقداراً ثابتاً . وهكذا ، اذا أعطينا عدسة فإنها ( مادمنا نقتصر على الأشعة المحورية ) لا تجمّع فقط من O الى O′ ، وانما بين عددٍ لانهائي من أزواج النقاط ، ما دامت أزواج النقاط هذه تقبل العلاقة التي تفيد بأن $\frac{n}{s'} + \frac{1}{s}$ مقدار ثابت مميزٌ للعدسة .

وهناك بوجه خاص ، حالة تثير الاهتمام عندما $s \to \infty$ . يمكننا أن نرى من الصيغة السابقة أنه كلما ازداد أحد البعدين ، نقص الآخر . وبعبارة أخرى ، إذا ابتعدت النقطة O ، اقتربت النقطة O′ ، والعكس بالعكس . وعندما تتجه النقطة O نحو اللانهاية ، تواصل النقطة O′ اقترابها حتى تصبح على بعدٍ معين ، يسمى البعد المحرقي f′ ، داخل المادة. إذن إذا وردت السطح أشعة متوازية فإنها ، بعد انكسارها ، تلاقي المحور على بعدٍ f′ . وبالمثل ، يمكننا أن نتخيل الأمر بالاتجاه الآخر . ( تذكّر قاعدة التبادل : إذا كان الضوء يسير من O إلى O′ فإنه بالطبع يسير أيضاً من O′ إلى O . ) إذن ، إذا كان لدينا منبع ضوئي داخل الزجاج ، فقد نود معرفة أين يكون التجميع . وبوجه خاص ، لو كان الضوء في الزجاج في اللانهاية ( المسألة نفسها ) فأين يتجمع خارجه؟ إنه يتجمع على بعدٍ معين نسميه f . وبالطبع ، يمكننا أيضاً أن نطرح السؤال على النحو الآخر . اذا كان لدينا منبع ضوئي على بعدٍ f واخترق الضوء السطح فإنه يبرز منه في حزمة متوازية . ويمكننا أن نجد بسهولة قيمة كل من f و f′ :

$$f' = Rn/(n-1) \quad \text{أو} \quad n/f' = (n-1)/R \qquad (27-4)$$

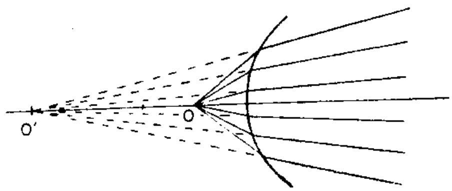
$$f = R/(n-1) \quad \text{أو} \quad 1/f = (n-1)/R \qquad (27-5)$$

ونرى في هذا أمراً مثيراً للاهتمام : إذا قسّمنا كل بعدٍ محرقي على قرينة الانكسار المقابلة له ، حصلنا على النتيجة نفسها ؟ هذه الدعوى هي في الحقيقة دعوى عامة . وهي صحيحة من أجل أي جملة من جمل العدسات ، مهما كانت معقدة ، فمن المهم أن يتذكر المرء ذلك . إننا لم نبرهن هنا على أن هذا عام ، وإنما لاحظناه من أجل سطح وحيد فحسب ، ولكن اتفق أنْ كان صحيحاً بوجه عام أن البعدين المحرقيين في جملة ما يرتبطان معاً على ذلك النحو . وتكتب المعادلة (27 – 3) أحياناً بالشكل التالي :

$$1/s + n/s' = 1/f \qquad (27\text{–}6)$$

وهذه أكثر فائدة من (27 – 3) لأنه يمكننا قياس f بأسهل مما يمكننا قياس انحناء العدسة وقرينة انكسارها : فإذا كنا لا نهتم بتصميم العدسة أو بمعرفة كيف أصبحت على ما هي عليه ، ولكننا نهتم فقط باستعمالها فالكمية المهمة هي f وليست n أو 1 أو R !

وتحدث حالة هامة عندما تكون s أقل من f . فماذا يحدث حينئذ ؟ إذا كان $s < f$ فإن $(1/s) > (1/f)$ ، وتكون $s'$ حينئذ سالبة ؛ وتنص



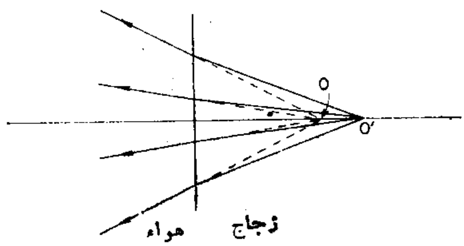

الشكل (٢٧–٣) : خيال وهمي

A virtual image

معادلتنا على أن الضوء يتجمع فقط حيث تكون $s'$ ذات قيمة سالبة ، فماذا يعني ذلك ! إنه يعني شيئاً هاماً جداً لا لبس فيه إطلاقاً . وبعبارة أخرى ، تظل هذه الصيغة صيغة مفيدة ، حتى ولو كانت الأعداد سالبة . وما تعنيه يبينه الشكل (٢٧ – ٣). إذا رسمنا الأشعة المتباعدة من O ، فإنها تنحرف عند السطح

حقاً ، ولا تتجمع لأن O قريبة جداً إلى حد يجعل الاشعة متباعدة . ولكنها تتباعد كما لو أنها تصدر من نقطة O′ خارج الزجاج . وهذا خيال ظاهري ، يسمى أحياناً خيالاً وهمياً . ويسمى الخيال O′ في الشكل ( ٢٧ – ٢) خيالاً حقيقياً . فإذا تجمع الضوء فعلاً في نقطة ، كان هذا خيالاً حقيقياً . أما اذا بدا أن الضوء يصدر من نقطة خيالية مختلفة عن النقطة الاصلية ، كان ذلك خيالاً وهمياً . وعلى هذا ، عندما ينتج أن s′ سالبة ، فذلك يعني أن O′ تقع في الجانب الآخر من السطح ، ويكون كل شيء على ما يرام .

لننظر الآن في الحالة الهامة حين تساوي R اللانهاية ؛ فيكون لدينا حينئذ $(1/s) + (n/s') = 0$ . وبعبارة أخرى ، $s' = -ns$ ، وهذا يعني أنه إذا نظرنا من وسط كثيف إلى نقطة في وسط متخلخل ، فإنها تظهر أعمق مما هي حقاً بعامل n . وبالمثل ، يمكننا استعمال المعادلة نفسها على نحو معاكس ، بحيث إذا وجهنا نظرنا نحو سطح مستو لرؤية جسم واقع على بعد معين منه داخل الوسط الكثيف ، فإنه يبدو كما لو أن الضوء صادر من نقطة ليست على ذلك البعد ، كما في الشكل (٢٧ – ٤) . فإذا نحن نظرنا إلى قاع حوض للسباحة من




الشكل ( ٢٧ – ٤ )

سطح مستو يكوّن للنقطة O′ خيالاً في O

Aplane surface re-images the light from O′ to O

أعلاه ، بدا لنا أقل عمقاً مما هو حقاً بعامل مقداره ( $\frac{3}{4}$ ) ، وهو مقلوب قرينة انكسار الماء .

ويمكننا المضي طبعاً في مناقشة المرآة الكروية . ولكن إذا قدّر المرء الأفكار السابقة حق التقدير ، فإنه قادر على أن يقوم بذلك بنفسه . لهذا السبب نترك للطالب أن يستنبط صيغة المرآة الكروية ، ولكننا نشير إلى أنه يحسن اتباع بعض الاصطلاحات الخاصة بالمسافات الداخلة في الحساب :

(١) بعد الجسم s موجب إذا كانت النقطة O على يسار السطح .

(٢) بعد الخيال 's موجب إذا كانت النقطة 'O على يمين السطح .

(٣) نصف قطر انحناء السطح موجب إذا كان مركزه يقع على يمين السطح .

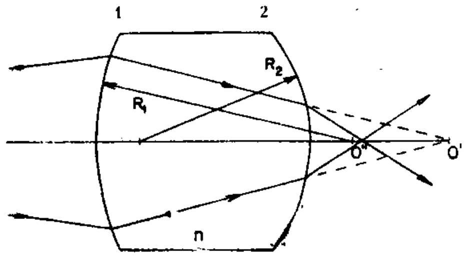
ففي الشكل (٢٧–٢) ، مثلاً ، تكون s و 's و R كلها موجبة ؛ وفي الشكل (٢٧– ٣) تكون s و R موجبتين وتكون 's سالبة . ولو أننا استعملنا سطحاً مقعراً ، لظلت الصيغة ( 3 – 27 ) تعطي النتيجة المضبوطة فيما اذا جعلنا R مقداراً سالباً .

وحين تستخرج الصيغة العائدة للمرآة باستخدام الاصطلاحات السابقة ، سوف تجد أن الصيغة الصحيحة تنتج فيما اذا وضعت $n = -1$ في الصيغة ( 3– 27 ) ، ( كما لو أن للمادة التي خلف المرآة قرينة تساوي 1 – ) !

وبالرغم من أن استخراج الصيغة ( 3 – 27 ) بسيط ورائع باستخدام الزمن الأصغر ، الا أنه يمكن طبعاً استخراج الصيغة نفسها باستخدام قانون سنيل ، على أن تكون الزوايا من الصغر بحيث يمكن أن يُستعاض عن جيوب الزوايا بالزوايا نفسها .

ونمضي الآن الى النظر في حالةٍ أخرى ذات أهمية عملية. إن لمعظم العدسات التي نستعملها سطحين لا سطحاً واحداً فقط . فكيف يؤثر ذلك على الأمور ؟ لنفترض أن لدينا سطحين انحناءاهما مختلفان ، يملأ ما بينهما زجاج كما في الشكل (٢٧ – ٥) . ونود دراسة مسألة التجميع من نقطة O إلى نقطة أخرى O′ . فكيف يمكننا القيام بذلك ؟ والجواب هو ما يلي : أولاً ، نستخدم الصيغة (27 –3) من أجل السطح الأول، متناسين وجود السطح الثاني . فهذا يطلعنا على أن الضوء الذي كان متباعداً من O يظهر متقارباً في نقطة ما مثل O′ أو متباعداً عنها ، حسبما تكون الإشارة . ولننظر الآن في مسألة جديدة . لدينا سطح مختلف يفصل بين الزجاج والهواء ، وتتقارب الأشعة الساقطة عليه نحو نقطة معينة O′ . فأين تتجمع هذه الأشعة بالفعل ؟ نستخدم الصيغة نفسها مرة أخرى ! فنجد أن الأشعة تتجمع في O″ . وهكذا يمكننا فعل ذلك من أجل (٧٥) سطحاً ، إذا دعت الضرورة ، وذلك باستخدام الصيغة نفسها فقط وعلى التعاقب سطحاً تلو سطح !

وهناك صيغ معقدة يمكنها أن توفّر علينا طاقة كبيرة في المرات القليلة من




الشكل (٢٧ – ٥)

تشكيل الخيال بعدسة ذات سطحين

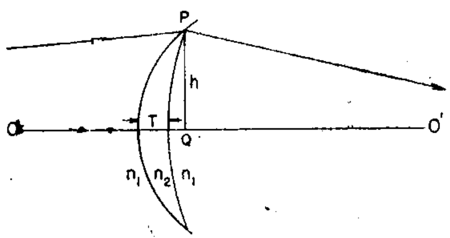
Image formation by a two-surface lens

حياتنا التي نُضطر فيها لتعقّب الضوء خلال خمسة سطوح . ولكن تعقّب الضوء خلال خمسة سطوح ، عندما يقتضي الأمر ذلك ، أسهل من حفظ عددٍ كبيرٍ من الصيغ ، إذ قد يحدث أننا لن نُضطر إطلاقاً إلى تعقب الضوء خلال أي سطحٍ من السطوح !

وعلى كل حال ، فإن المبدأ هو أننا عندما نجتاز سطحاً نلاقي وضعاً جديداً ، أي نقطة تجمع جديدة ، فنتخذ هذه النقطة نقطة انطلاق من أجل السطح التالي وهكذا دواليك . ولكي نقوم بذلك فعلاً ، وما دمنا ننتقل من n إلى 1 عند السطح الثاني ، وليس من 1 إلى n ، وما دام هناك في عددٍ من الجمل أكثر من نوع واحد من الزجاج ، بحيث تكون هناك قرائن $n_1$ و $n_2$ و ..... ، فإننا نحتاج في الحقيقة إلى تعميم الصيغة ( 3 - 27 ) على حالةٍ تكون فيها قرينتان مختلفتان $n_1$ و $n_2$ عوضاً عن قرينة واحدة n . وليس من الصعب حينئذ إثبات أن الصيغة العامة للمعادلة ( 3 — 27 ) تصبح كما يلي :

$$(n_1/s) + (n_2/s') = (n_2 - n_1)/R \qquad (27 - 7)$$

وهناك حالة بسيطة بشكل بارز هي الحالة الخاصة التي يكون فيها السطحان قريبين جداً أحدهما من الآخر ، أي قريبين جداً بحيث يمكن تجاهل الأخطاء الضئيلة العائدة إلى الثخن . فإذا رسمنا العدسة ، كما هو مبين في الشكل(٢٧-٦)،




الشكل (٢٧-٦)
عدسة رقيقة ذات نصفي قطرين موجبين

فإنه يمكننا أن نسأل السؤال التالي : كيف ينبغي صنع العدسة حتى تجمّع الضوء الوارد من O في O′ ؟ لنفترض أن الضوء يسقط تماماً على طرف العدسة عند النقطة P . فزيادة الزمن في السير من O الى O′ تساوي حينئذ : ( $n_1h^2/2s' + n_1h^2/2s$ ) ، وذلك إذا تجاهلنا مؤقتاً الثخن T للزجاج ذي القرينة $n_2$ . والآن ، لجعل زمن المسار المباشر مساوياً زمن المسار OPO′ ، ينبغي علينا استعمال قطعة من الزجاج يكون ثخنها T عند المركز بحيث أن التأخر الذي تحدثه في السير خلال هذا الثخن يكون كافياً لأن يكافىء زيادة الزمن المذكورة أعلاه . وبناء على ذلك ، ينبغي أن يكون ثخن العدسة عند المركز معطىً بالعلاقة التالية :

$$(n_1 h^2/2s) + (n_1 h^2/2s') = (n_2 - n_1)\, T \qquad (27\text{-}8)$$

يمكننا كذلك أن نعبر عن T بدلالة نصفيْ القطرين $R_1$ و $R_2$ للسطحين . فإذا أخذنا بعين الاعتبار اصطلاحنا الثالث ، فإننا نجد من أجل $R_1 < R_2$ ( أي من أجل العدسة الهلالية المبينة في الشكل ) :

$$T = (h^2/2R_1) - (h^2/2R_2) \qquad (27\text{-}9)$$

وعليه فإننا نحصل أخيراً على ما يلي :

$$(n_1/s) + (n_1/s') = (n_2 - n_1)\,(1/R_1 - 1/R_2) \qquad (27\text{-}10)$$

والآن ، نشير ثانية إلى أنه إذا كانت إحدى النقطتين في اللانهاية فإن النقطة الأخرى تكون على بعد نسميه البعد المحرقي f . وهذا البعد المحرقي f يعطى بالعلاقة :

$$1/f = (n - 1)\,(1/R_1 - 1/R_2) \qquad (27\text{-}11)$$

حيث $n = n_2/n_1$ .

والآن ، إذا أخذنا الحالة المعاكسة التي تسعى فيها s إلى اللانهاية ، فاننا نجد أن s′ تساوي البعد المحرقي f′ . ففي هذه المرة يكون البعدان المحرقيان متساويين . ( وهذه هي حالة خاصة أخرى من القاعدة العامة التي تنص على أن النسبة بين البعدين المحرقيين تساوي النسبة بين قرينتي الانكسار في الوسطين اللذين ينتشر فيهما الضوء ويتجمع . وفي هذه الجملة الضوئية الخاصة ، تتساوى القرينتان الأولى والأخيرة ، لذلك يتساوى البعدان المحرقيان ) .

وإذا نحن تناسينا لحظةً ما يتعلق بالصيغة الفعلية للبعد المحرقي ، واشترينا عدسة صممها أحدهم بنصفيْ قطريْ انحناء محددين وقرينة معينة ، فإنه يمكننا قياس البعد المحرقي مثلاً برؤية مكان تكوّن خيال نقطةٍ في اللانهاية. وحالما نحصل على البعد المحرقي ، يكون من الأفضل كتابة معادلتنا بدلالة البعد المحرقي مباشرة ، فتصبح الصيغة حينئذ كما يلي :

$$(1/s) + (1/s') = 1/f \qquad (27\text{-}12)$$

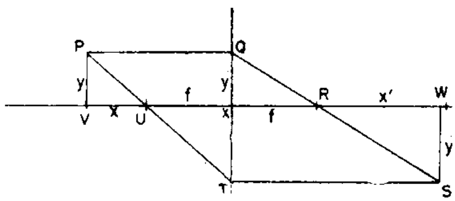
والآن ، لننظر كيف يكون فعل هذه الصيغة ، وما تقتضيه في ظروف مختلفة ؟ أولاً ، إنها تقتضي أنه عندما يكون أيٌّ من s أو s′ لا نهائياً ، فإن الآخر يكون مساوياً f . وهذا يعني أن الضوء المتوازي يتجمع على بعدٍ f ، وهذا هو في الحقيقة تعريف f . وأمر آخر هام تنص عليه الصيغة السابقة ، هو أن النقطتين كلتيهما تتحركان في اتجاه واحد . فإذا تحركت إحداهما نحو اليمين ، تحركت الأخرى مثل ذلك . وأمر آخر تنص عليه هو أن s و s′ تتساويان عندما تساوي كل منهما 2f . وبعبارة أخرى ، إذا رغبنا في وضع متناظر ، فإننا نجد ذلك عندما يكون التجمع في نقطتين على بعدٍ مقداره 2f .

## ٢٧ — ٤ : التكبير Magnification

لقد ناقشنا حتى الآن فعل التجميع فقط من أجل نقاط واقعة على المحور . لنناقش الآن أيضاً تكوين أخيلة الأجسام التي لا تقع تماماً على المحور ، وإنما على

بعدٍ صغير منه ، وذلك كي نتمكن من فهم خواص التكبير . عندما نهيء عدسة لتجميع الضوء الصادر من فتيل صغير على شاشة في « نقطة » منها ، نلاحظ أنه تتكون على الشاشة « صورة » للفتيل نفسه ، إلا أنها أكبر من الفتيل الحقيقي أو أصغر منه . وينبغي أن يدل هذا على أن الضوء الوارد من كل نقطة من الفتيل يتجمع في نقطةٍ ما من الشاشة . ولكي ندرك هذا أكثر قليلاً ، لنحللْ جملة العدسة الرقيقة المبينة بطريقة مبسطة مبيّنة في الشكل (٢٧ — ٧) . إننا نعرف الحقائق التالية :

(١) أي شعاع يرد موازياً للمحور من أحد الجانبين يبرز متجهاً نحو نقطة خاصة تسمى المحرق واقعة في الجانب الآخر على بعدٍ من العدسة يساوي f .




الشكل (٢٧ - ٧)

رسم هندسي يبين تكوين خيالٍ ما في عدسة رقيقة

(٢) أي شعاع يرد على العدسة من المحرق في أحد الجانبين يبرز موازياً للمحور في الجانب الآخر .

وهذا هو كل ما نحتاجه لاستخراج الصيغة ( 27-12 ) بواسطة الهندسة كما يلي : لنفترض أن لدينا جسماً على بعدٍ x من المحرق ؛ وليكن ارتفاع الجسم y . إننا نعرف أن أحد الأشعة ، وهو PQ ، ينحرف بحيث يمر من المحرق R في الجانب الآخر . والآن ، إذا كانت العدسة تكوّن للنقطة P

خيالاً ، فإنه يمكننا أن نجد أين يكون ذلك إذا نحن وجدنا أين يسير شعاع آخر فقط ، لأن التجمع الجديد سيكون حيث يتقاطع الشعاعان مرة ثانية . ولا نحتاج إلا إلى استعمال براعتنا لإيجاد المنحى الصحيح لشعاعٍ واحد آخر . ولكننا نتذكر أن الشعاع الموازي للمحور يبرز ماراً من المحرق ، والعكس بالعكس : أي أن الشعاع المار بالمحرق يبرز موازياً للمحور! وبناء على هذا نرسم الشعاع PT ماراً من U . ( صحيح أن الأشعة الفعلية التي تقوم بالتجميع يمكن أن تكون محصورة ضمن حدود أقل كثيراً من الشعاعين اللذين رسمناهما ، ولكن هذه الأشعة أصعب تشكيلاً ، لذلك نتظاهر بأنه يمكننا رسم هذا الشعاع.) ونظراً لأنه يبرز موازياً للمحور ، نرسم TS موازياً لـ XW . فتكون نقطة التقاطع S هي النقطة المطلوبة . وهذا يحدد المكان الصحيح والارتفاع الصحيح. لنسمِّ هذا الارتفاع $y'$ والبعد عن المحرق $x'$ . ويمكننا الآن اشتقاق صيغة العدسة . فباستخدام المثلثين المتشابهين PVU و TXU ، نجد :

$$\frac{y'}{f}=\frac{y}{x} \qquad (27-13)$$

وبالمثل ، نحصل من المثلثين SWR و QXR على :

$$\frac{y'}{x'}=\frac{y}{f} \qquad (27-14)$$

وبحل كلٍ من هاتين العلاقتين من أجل $y'/y$ نجد أن :

$$\frac{y'}{y}=\frac{x'}{f}=\frac{f}{x} \qquad (27-15)$$

وهذه المعادلة (27-15) هي الصيغة المشهورة للعدسة ، ففيها كل ما نحتاج إلى معرفته عن العدسات : إنها تطلعنا على التكبير $y'/y$ بدلالة المسافتين والبعد

المحرقي . وهي أيضاً تربط بين المسافتين x و x′ وبين f :

$$x x' = f^2 \qquad (27\text{–}16)$$

وهي صيغة أبسط شكلاً من المعادلة ( 27–12 ) ، وهي لذلك أيسر استعمالاً . ونترك للطالب أن يثبت أن المعادلة (27 — 12) تصبح كالمعادلة (27 — 16) فيما إذا سمينا :

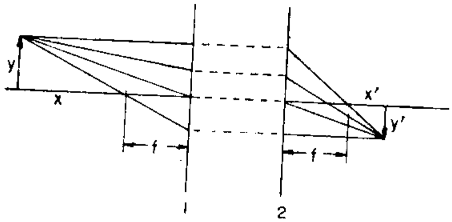
$$s = x + f \quad \text{و} \quad s' = x' + f$$

## ٢٧ — ٥ : العدسات المركبة Compound lenses

سوف نصف باختصار النتيجة العامة عندما يكون لدينا عدد من العدسات ، وذلك دون أن نستخرجها فعلاً . إذا كانت لدينا جملة مؤلفة من عدة عدسات ، فكيف يمكننا تحليلها ؟

إن ذلك سهل . نبدأ بجسم ما ونحسب أين يقع خياله في العدسة الأولى باستخدام الصيغة (27 — 16) أو (27 — 12) أو أي صيغة أخرى مكافئة ، أو برسم مخططات ، فنحصل بذلك على خيال . بعدئذ نعامل هذا الخيال كأنه جسم بالنسبة للعدسة الثانية ، ونستعمل هذه العدسة الثانية مهما كان بعدها المحرقي لإيجاد خيال من جديد . ونتعقب الامر خلال العدسات المتتالية ، ليس إلا . وهذا هو كل ما هنالك . إنه لا يتضمن شيئاً جديداً من حيث المبدأ ، لذلك لن نبحث فيه . ومع ذلك ، فهناك نتيجة هامة جداً تنجم عن آثار أي مجموعة من العدسات المتعاقبة في الضوء الذي يبدأ وينتهي في الوسط نفسه ، كالهواء مثلاً . إن أي آلة بصرية – كالنظارة أو المجهر المزودين بعدد من المرايا والعدسات – تتمتع بالخاصة التالية : هناك مستويان ، يسميان المستويين الاصليين للجملة ( ويكون هذان المستويان في الغالب مجاورين إلى

حدٍ ما للسطح الاول في العدسة الاولى وللسطح الاخير في العدسة الاخيرة ) ، ولهذين المستويين الخاصتان التاليتان : (١) إذا كان الضوء يرد على الجملة من الجانب الاول موازياً للمحور ، فإنه يبرز منهـــا نحو محرق يقع على بعدٍ من المستوي الاصلي الثاني يساوي البعد المحرقي f ، تماماً كما لو أن الجملة عدسة رقيقة واقعة عند هذا المستوي . (٢) إذا كان الضوء يرد على الجملة من الجانب الآخر موازياً للمحور ، فإنه يبرز منها نحو محرق يقع على البعد f نفسه من المستوي الاصلي الاول ، كما لو أن هناك عدسة رقيقة واقعة عند هذا المستوي . انظر الشكل ( ٢٧ – ٨ ) .




الشكل (٢٧ – ٨)
تمثيل المستويين الأصليين لجملة ضوئية

وبالطبع ، إذا قسنا المسافات x و x' و y و y' كما فعلنا من قبل ، فإن الصيغة ( 16–27 ) التي كتبناها من أجل العدسة الرقيقة تكون صيغة عامة قطعاً ، شريطة أن نقيس البعد المحرقي بدءاً من المستويين الأصليين وليس بدءاً من مركز العدسة . والواقع أن المستويين الأصليين في العدسة الرقيقة متطابقان . فالأمر تماماً كما لو أننا تمكنا من شطر عدسة رقيقة من وسطها وباعدنا ما بين الشطرين دون أن نلحظ انفصالهما . فكل شعاع وارد يقفز مباشرة إلى الجانب الآخر من المستوي الأصلي الثاني عند نفس النقطة التي ورد اليها في المستوي الأول ! ويمكن إيجاد المستويين الأصليين والبعد المحرقي إمـا بالتجربة أو

بالحساب ، وحينئذ تكون كافة خواص الجملة الضوئية قد عُرفت . ومن الممتع جداً أن تكون النتيجة غير معقدة مع كون الجملة الضوئية على قدر عظيم من الكبر والتعقيد .

## ٢٧ — ٦ : الزيوغ Aberrations

وقبل أن يثيرنا أكثر مما ينبغي ما وجدنا من روعة في العدسات،ينبغي علينا أن نسارع إلى القول بأن هناك أيضاً قيوداً جدية ، وذلك لاننا ، إذا توخينا الدقة ، ينبغي أن نُقر بأننا أقتصرنا على الأشعة المحورية ، أي الأشعة القريبة من المحور . فالعدسة الحقيقية ذات الحجم المحدود تُظهر زيوغاً بوجه عام . فمثلاً الشعاع المنطبق على المحور يمر طبعاً بالمحرق ؛ والشعاع القريب جداً من المحور يمر أيضاً من المحرق تماماً . ولكن ما أن يبتعد عن المحور حتى يبدأ الشعاع بأن يحيد عن المحرق فلا يبلغه ، والشعاع الذي يرد طرف العدسة ينكسر قاطعاً المحور في نقطة تبعد عن المحرق بعداً كبيراً . وهكذا نحصل على لطخة عوضاً من خيال نقطي. ويسمى هذا الأثر الزيغ الكروي ، لأنه من خواص السطوح الكروية التي نستعملها عوضاً عن السطح ذي الشكل الصحيح . ويمكن إصلاح هذا الزيغ من أجل أي مسافة معينة للجسم ، بإعادة تكوين شكل سطح العدسة ، أو ربما باستعمال عدة عدسات مرتبة بحيث يُفني زيغ عدسة زيغ عدسة أخرى .

وللعدسات عيب آخر : ذلك أن للأضواء المختلفة الألوان سرعات مختلفة أو قرائن انكسار مختلفة في الزجاج ، لذلك يكون البعد المحرقي لعدسة معطاة مختلفاً باختلاف اللون . وهكذا ، إذا كوّنا لبقعة بيضاء خيالاً ، فإن هذا الخيال يكون ملوناً ، إذ عندما نحكم العدسة من أجل الضوء الأحمر يكون الضوء

الأزرق بعيداً عن التحكيم والعكس بالعكس . ويطلق على هـذه الخاصة الزيـغ اللوني .

وهناك أيضاً عيوب اخرى. فإذا لم يكن الجسم على المحور ، لم يعد التحكيم كاملاً في النقاط البعيدة عن المحور بعداً كافياً . وأيسر طريقة للتحقق من ذلك هي أن نحكم العدسة من أجل خيالٍ ما ثم نميل العدسة بحيث تسقط عليها الأشعة مائلة بزاوية كبيرة على المحور ، فيُرى أن الخيال يصبـح حينئذ سيئاً ، وقـد لا نجد على الاطلاق مكاناً يكون فيه التحكيم جيداً . فهناك إذن بضعة ضروب من العيوب في العدسات يسعى المصمم الضوئي الى إصلاحها باستعمال عدة عدسات ليصحح عيبُ كل منها عيبَ الأخرى .

كم ينبغي أن تكون عليه عنايتنا للتخلص من الزيوغ ؟ هل من الممكن صنع جملة ضوئية كاملة كمالاً مطلقاً ؟ لنفترض أننا صنعنا جملة ضوئية تجمع الضوء في نقطة تجميعاً تاماً. فإذا أجرينا المحاكمة من وجهة نظر الزمن الأصغر ، فهل يمكننا أن نجد الشرط الذي يبين مبلغ ما ينبغي أن تكون عليه الجملة من كمال ؟ إن للجملة فتحةً من نوعٍ ما لدخول الضوء . فإذا اعتبرنا أبعد شعاعٍ عن المحور يمكنه أن يمر من المحرق ( فيما اذا كانت الجملة كاملة طبعاً ) ، فإن الأزمان من أجل كل الأشعة تكون متساوية تماماً . ولكن لا شيء كامل ، فالسؤال هـو إذن : أي مقدار من الخطأ في الزمن يمكن أن يبلغه هذا الشعاع بحيث لا يعود من المفيد تصحيحه فيما بعد ذلك ؟ إن هذا يتوقف على درجة الكمال التي نود أن يصل اليها الخيال ، ولكن لنفترض أننا نود أن يكون الخيال أكمل ما يمكن . فحينئذ تكون أول فكرة تراودنا هي ان علينا ، طبعاً ، ان نرتب الأمر بحيث يستغرق كل شعاع الزمن نفسه ما امكن ذلك . ولكن يتبين لنا ان هذا ليس صحيحاً ، واننا نسعى ، اذا نشدنا ابعد من حد معين ، الى بلوغ شيء على قدر من الدقة يستحيل بلوغه ، لأن نظرية الضوء الهندسي لا تكون صالحة حينئذ !

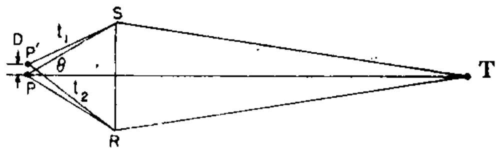
لنتذكر ان مبدأ الزمن الاصغر ليس صيغة دقيقة ، على خلاف مبدأ انحفاظ الطاقة او مبدأ انحفاظ الاندفاع . فمبدأ الزمن الاصغر ليس إلا تقريباً ، ومن المهم ان نعرف مبلغ الخطأ الذي يمكن السماح به دون ان يحدث فرق ظاهر . والجواب هو انه إذا رتبنا الامر بحيث يكون بين اقصى شعاع ، وهو أسوأ شعاع ، والشعاع المركزي ، فرق في الزمن اقل تقريباً من الدور الموافق لاهتزازة الضوء ، فإنه لايعود من المفيد حينئذ تحسين الامر الى ابعد من ذلك. فالضوء شيء مهتز بتواتر معين يرتبط بطول الموجة ، واذا نحن رتبنا الامر بحيث يكون الفارق الزمني بين شعاعين مختلفين اقل من الدور ، فإنه ليس من المفيد المضي الى ابعد من ذلك .

## ٢٧ ــ ٧ : مقدرة الفصل Resolving power

وهناك سؤال هام آخر ، هو سؤال تقني هام جداً بالنسبة الى كل الادوات الضوئية ، وهو مقدرة الفصل فيها . إننا عندما نصنع مجهراً ، فإنما ينبغي ان نرى الاجسام التي ننظر اليها من خلاله . وهذا يعني مثلاً ، اننا إذا كنا ننظر إلى جرثومة ما عليها بقعة في كل من طرفيها ، فإننا نبغي أن نرى ان هناك نقطتين عندما نكبّرهما. وقد يفكر المرء ان كل ما ينبغي علينا فعله هو الحصول على تكبير كاف : فيمكننا دائماً ان نضيف عدسة أخرى ، ويمكننا دائماً ان نكبّر مراراً وتكراراً ، كما يمكن بفضل عبقرية المصممين أن نتخلص من كل الزيوغ الكروية والزيوغ اللونية ، وليس هناك أي سبب يجعلنا لا نستطيع الاستمرار في تكبير الخيال . وعلى هذا فالقيود على المجهر ليست في أن من المستحيل صنع عدسة تكبّر أكثر من ( ٢٠٠٠ ) مرة . إن باستطاعتنا صنع جملة من العدسات تكبر ( ١٠٠٠٠ ) مرة ، ولكننا مع ذلك نعجز عن رؤية نقطتين قريبتين قرباً مفرطاً إحداهما من الأخرى ، وذلك بسبب حدود

صحة الضوء الهندسي ، أي بسبب ان مبدأ الزمن الأصغر ليس دقيقاً .

إن القاعدة التي تعيّن البعد الذي ينبغي أن يكون بين نقطتين حتى يظهر خيالاهما منفصلين هي قاعدة يمكن التعبير عنها تعبيراً رائعاً مشتقاً من الازمنة اللازمة للأشعة المختلفة . لنفترض أننا الآن اهملنا الزيوغ ، ولنتصور أنه من اجل نقطة معينة P ظاهرة في الشكل (٢٧ – ٩) ، تستغرق كل الاشعة الزمن نفسه تماماً




الشكل (٢٧ – ٩)
مقدرة الفصل لجملة ضوئية

في مساراتها من الجسم الى الخيال T . ( ليس هذا صحيحاً ، لان الجملة ليست جملة كاملة ، ولكن هذه قضية اخرى ) . لنأخذ الآن نقطة أخرى قريبة P′ ، ولنتساءل فيما اذا كان خيالها منفصلاً عن T . وبعبارة أخرى ، فيما إذا كنا نتمكن من التمييز بينهما . فوفقاً للضوء الهندسي ، لا شك أنه ينبغي أن يكون هناك خيالان نقطيان ، ولكن قد يكون ما نراه ليس الا لطخة وقد نعجز عن التأكد من أن هناك نقطتين . والشرط اللازم كي يتكوّن خيال النقطة الثانية في مكان مختلف عن مكان خيال النقطة الاولى هو أن الزمنين اللذين يستغرقهما الشعاعان الأقصيان P′ST و P′RT على كل من جانبيْ الفتحة الكبيرة للعدسات ، في مساريْهما من جانب الى الجانب الآخر ، ينبغي ألا يكونا متساويين ، وذلك إذا قسنا هذين الزمنين من خيال نقطي معطىً الى جسمين نقطيين يمكن ان يكون هذا الخيال خيالها . ولماذا ؟ لأنه ، لو تساوى الزمنان ، لتكوّن الخيالان في النقطة نفسها بلا ريب . وعلى هذا فلن يكون الزمنان متساويين . ولكن كم ينبغي ان يكون الفرق بين الزمنين حتى يمكننا القول بأن الخيالين

لا يتكونان في نقطة واحدة، بحيث نستطيع التمييز بين هذين الخيالين النقطيين؟ إن القاعدة العامة لمقدرة الفصل في أية آلة بصرية هي التالية : لا يمكن الفصل بين منبعين نقطيين مختلفين الا اذا تكون خيال احد المنبعين في نقطة ما بحيث ان الزمنين اللذين يستغرقها الشعاعان الاقصيان الواردان من المنبع الآخر ، في الوصول الى هذه النقطة ، بالمقارنة مع خياله النقطي الفعلي، يختلفان بأكثر من دور واحد . اي انه من الضروري ان يكون الفارق الزمني بين الشعاع العلوي والشعاع السفلي ، الواصلين الى المحرق الخاطىء اكبر من مقدار معين يساوي تقريباً دور اهتزازة الضوء :

$$t_2 - t_1 > 1/\nu \qquad (27-17)$$

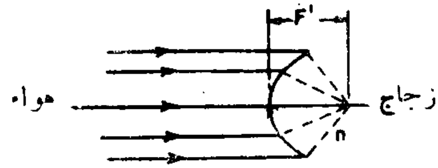
حيث $\nu$ هو تواتر الضوء ( أي عدد الاهتزازات في الثانية او سرعة الضوء مقسومة على طول موجته ) . فإذا سمينا المسافة الفاصلة بين النقطتين D ، والفتحة الزاوية للعدسة $\theta$ ، فإنه يمكننا حينئذ أن نثبت بأن ( 17 - 27 ) تكافىء تماماً القول بأن D ينبغي أن تزيد عن $\lambda / n \sin \theta$ ، حيث n : قرينة الانكسار عند P و $\lambda$ : طول الموجة . فأصغر الاشياء التي يمكننا رؤيتها هي إذن تلك التي تساوي طول موجة الضوء تقريباً . وهناك صيغة مقابلة من اجل النظارات ، وهي تعطينا اصغر بعد زاوي بين نجمين نكاد نستطيع التمييز بينهما * .

* * *

* الزاوية تساوي نحو $\lambda / D$ ، حيث D : قطر العدسة . هل يمكنك إدراك السبب؟

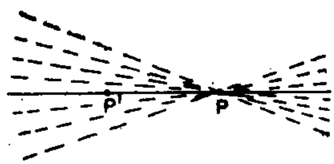
## — مسائل وتمارين —

٢٧-١ : نريد أن نجمع حزمة متوازية من الضوء ، المنتشر في الهواء ، في محرق نقطي بواسطة سطح كاسر وحيد يحد منطقة قرينة انكسارها n .
أوجد الشكل المناسب لهذا السطح . انظر إلى الشكل (٢٧- ١٠) .




الشكل (٢٧-١٠)

٢٧-٢ : تتقارب حزمة ضوئية فتتجمع في نقطة معينة P . ونرغب أن ندخل سطحاً عاكساً وحيداً ماراً من نقطة محورية محددة Q ، حتى يتجمع الضوء في محرق نقطي جديد عند نقطة معطاة P' . أوجد شكل السطح المطلوب ، مفترضاً أن : $QP' = D$ و $QP = d$ .
انظر الى الشكل (٢٧ — ١١) .




الشكل (٢٧-١١)

٢٧-٣ : يساوي القطر الخارجي لقطعة من أنبوب شعري زجاجي D ، وتساوي قرينة انكسارها n . وعندما ننظر من الجانب ، يبدو قطر الأنبوب الشعري الصغير مساوياً d . فما هو القطر الحقيقي d′ لهذا الانبوب ؟

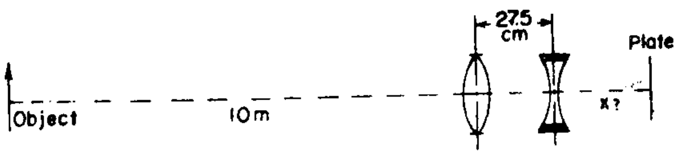
٢٧-٤ : تشكل عدسة ، ذات بعد محرقي F ، خيالاً حقيقياً لجسم بعيد . ويُرى هذا الخيال من خلال مكبرة ذات بعد محرقي f . فإذا كانت العين محكّمة على اللانهاية أثناء الرؤية ، فأوجد التضخيم الزاوي الظاهري للجملة .

٢٧-٥ : تستطيع عين الإنسان النموذجية ان تقوم بعملية المطابقة من أجل أجسام تقع بين 25 cm واللانهاية . توضع عدسة مكبرة رقيقة بسيطة بعدها المحرقي $f = +5$ cm مباشرة أمام العين والمطلوب :

(أ) ما هما الوضعان الحدّيان ، اللذان إذا وضع بينهما جسم ما ، امكنت رؤيته بوضوح ؟

(ب) عيّن التكبير الزاوي الموافق لكل من هذين الوضعين .

٢٧-٦ : تتألف آلة تصوير ، قادرة على تصوير الاجسام من بعد ، من عدسة موجبة بعدها المحرقي $f_1 = +30$ cm ومن عدسة سالبة بعدها المحرقي $f_2 = -10$ cm . وتساوي المسافة الفاصلة بين العدستين 27.5 cm ، انظر الى الشكل (٢٧-١٢) . أين ينبغي وضع لوح




الشكل (٢٧-١٢)

التصوير لأخذ صورة جسم يبعد عشرة أمتار أمام العدسة الاولى ؟
ارسم بعناية مخطط الاشعة .

٢٧-٧ : يساوي البعد المحرقي لنظارة (هيل) الفلكية ، التي قطرها 200 انشاً ، والتي تستخدم وفقاً لتصميم ( كود ) الضوئي ، 533 ft . فماذا ينبغي ان تكون المسافة بين المستوي المحرقي ، للنجوم البعيدة ، والمستوي المحرقي لـ :

( أ ) القمر ؛ (ب) تابع ارضي صنعي على مدى مائل قدره 200 ميلاً؟

٢٧-٨ : عدستان رقيقتان L و L′ ، بعداهما المحرقيان f و f′ ، تفصل بينهما مسافة D . اوجد البعد المحرقي المكافىء F للجملة ، والمسافتين Δ و Δ′ التي يبعد بها المستويان الاصليان عن العدستين المقابلتين لهما L و L′ .

* * *

# الفصل الثامن والعشرون

# الاشعاع الكهرطيسي

## ٢٨ ـــ ١ : الكهرطيسية

إن أعظم المراحل إثارة في تطور الفيزياء هي تلك المراحل التي تتم فيها اندماجات عظيمة، حين يُكتشف فجأة أن ظواهر كانت تبدو في السابق مختلفة فيما بينها ليست إلا مظاهر مختلفة للشيء نفسه . وتاريخ الفيزياء هو تاريخ مثل هذه الاندماجات، والأساس في نجاح العلم الفيزيائي هو في الدرجة الأولى أننا قادرون على الدمج .

ولعل اعظم المراحل اثارة في تطور الفيزياء خلال القرن التاسع عشر هي التي مرّ بها ج . ك . مكسويل ذات يوم من عام ١٨٦٠ عندما ألّف بين قوانين الكهربائية والمغناطيسية وقوانين سلوك الضوء . ونتيجة لذلك ، فُهمت جزئياً خواص الضوء ، أي خواص هذا الشيء العريق الدقيق الذي بلغ من الأهمية والغموض حداً جعل من الضروري ، لدى كتابة سفر التكوين ، الإشارة إشارة خاصة الى خلقه . وقد كان بوسع مكسويل أن يقول حين انتهى من اكتشافه « كوني يا كهرباء ويامغنطيسية ، فيكون الضوء ! » .

وقد سبق هذه المرحلة الحاسمة إعداد طويل لاكتشاف قوانين الكهرباء والمغناطيسية وكشفها تدريجياً . وسوف نرجىء هذه القصة لدراستها دراسة مفصلة فيالسنة التالية. ومع ذلك ، فالقصة باختصار هي كما يلي: إن ما اكتشف

تدريجياً من خواص الكهرباء والمغناطيسية وقوى التجاذب والتدافع الكهربائية ، والقوى المغناطيسية يبين انه بالرغم من أن هـذه القوى معقدة نوعاً ما ، فإنها جميعها تتناقص متناسبة عكساً مع مربع البعد . فنحن نعرف مثلاً ان قانون كولون البسيط من اجل الشحنات الساكنة هو أن القوة الكهربائية تتغير متناسبة عكساً مع مربع البعد . ونتيجة لذلك ، يكون تأثير جملة شحنات على جملة اخرى ضئيلاً جداً عندما تكون المسافة بينهما كبيرة كبراً كافياً . وقد لاحظ مكسويل ، عندما حاول ان يجمع ما بين المعادلات او القوانين التي كانت قد اكتشفت حتى ذلك الحين ، انها ليست متناسقة فيما بينها ، ووجد ان عليه ان يضيف اليها حداً آخر لكي تكون الجملة كلها متناسقة . وظهرت مع هذا الحد الجديد نبوءة مدهشة ، تلك ان قسماً من الحقلين الكهربائي والمغناطيسي يتناقص مع المسافة تناقصاً أبطأ بكثير مما يقتضيه التربيع العكسي ، فهو يتناسب عكساً مع المسافة ! وأدرك مكسويل بذلك من ان التيارات الكهربائية في مكان ما يمكنها ان تؤثر في شحنات اخرى على بعدٍ كبير منها ، وتنبأ بالآثار الأساسية التي أصبحت مألوفة لدينا اليوم ـ الإذاعة بالراديو والرادار وما الى ذلك .

وإنه ليبدو من العجائب انه اذا تكلم احد الناس في أوروبا فإنه يمكن ، بواسطة تأثيرات كهربائية صرفة ، سماعه في لوس انجلوس على بعد آلاف الأميال فكيف يمكن ذلك ؟ السبب هو ان الحقول لا تتغير وفقاً لقانون التربيع العكسي بل تتغير عكساً مع المسافة مرفوعة للقوة الاولى فقط . ثم اخيراً ، حتى الضوء نفسه ، تبين انه تأثيرات كهربائية ومغناطيسية تمتد الى مسافات شاسعة ، وتتولد عن اهتزاز الالكترونات في الذرات اهتزازات سريعة الى حدٍ يكاد لا يُصدَّق . كل هذه الظواهر نجملها في كلمة إشعاع ، او بصورة ادق إشعاع كهرطيسي ، إذ ان هناك ايضاً نوعاً أو نوعين آخرين من الإشعاع . ولكن كلمة الإشعاع تعني دائماً تقريباً الإشعاع الكهرطيسي .

وهكذا فالكون مترابط معاً . والحركات الذرية في نجم قصي يظل لها من التأثير ما يكفي،على ما هي عليه من بعد كبير ، لأن تحرّك الالكترونات في عيننا ، وبذلك نحصل على معارفنا عن النجوم . ولو لم يكن هذا القانون قائماً، لكنا جميعاً على جهل بما يتصل بالعالم الخارجي! كذلك فإن الجَيَشان الكهربائي في مجرّة تبعد عنا خمسة مليارات من السنوات الضوئية ـ وهو أبعد جسم كشفناه حتى الآن ـ قادر كذلك على التأثير بشكل محسوس وقابل للكشف على التيارات في « الصحن » الواسع الواقع في مقدمة نظارة راديوية . وعلى أساس من ذلك نرى النجوم والمجرّات .

إن هـذه الظاهرة الهامة هي الظاهرة التي سنناقشها في هذا الفصل . لقـد عرضنا في بداية كتاب الفيزياء هذا صورة عامة للكون ، ولكننا اصبحنا الآن اقدر على ادراك بعض مظاهره ، لذلك سوف نعود لدراسة بعض اجزائه بتفصيل اكبر . ونبدأ بوصف وضع الفيزياء في نهاية القرن التاسع عشر . وكل ما كان معروفاً حينئذ من القوانين الأساسية يمكن إجماله فيما يلي :

هناك اولاً قوانين القوى : إحدى هـذه القوى هي قانون الثقالة الذي تحدثنا عنه عدة مرات ؛ القوة التي يؤثر بها جسم كتلته M على جسم آخر كتلته m تعطى بالعلاقة التالية :

$$\mathbf{F} = GmM\mathbf{e}_r/r^2 \qquad (28-1)$$

حيث $\mathbf{e}_r$ ، متجهة الوحدة التي تتجه من m الى M ، وحيث r المسافة بين الجسمين .

وهناك ثانياً ، قوانين الكهرباء والمغناطيسية كما كانت معروفة في نهاية القرن التاسع عشر وهي التالية : يمكن وصف القوى الكهربائية المؤثرة على شحنة q بدلالة حقلين يسميان E و B وبدلالة السرعة v ، سرعة الشحنة q ، وذلك بواسطة المعادلة التالية :

$$\mathbf{F} = q\,(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \qquad (28\text{-}2)$$

ولإكمال هذا القانون ، علينا أن نذكر ما هما صيغتا **E** و **B** في حالة معطاة : إذا كان هناك عدد من الشحنات ، فإن كلاً من **E** و **B** هو مجموع إسهامات الشحنات كل منها على حدة. وعلى هذا، إذا كنا نستطيع إيجاد **E** و **B** ، اللذين تولدهما شحنة واحدة ، فلا نحتاج بعدئذ إلا الى جمع كل الآثار التي تحدثها كل الشحنات في الكون للحصول على **E** الكلية و **B** الكلية ! وهذا هو مبدأ الانضمام .

والآن ، ما هي صيغة الحقلين الكهربائي والمغناطيسي اللذين تولدهما شحنة واحدة ؟ لقد تبين أن هذه الصيغة معقدة كل التعقيد ، وأن إدراكها يتطلب قدراً كبيراً من الدراسة والحنكة . ولكن ليست هذه هي النقطة الأساسية . فنحن إنما ندوّن القانون الآن لنولّد لدى القارىء انطباعاً قوياً عن جمال الطبيعة ، إذا صح القول ، أي لنجعله يدرك أن من الممكن إجمال المعرفة الاساسية في صفحة واحدة ، باستخدام رموز مألوفة لديه في الوقت الحاضر. إن هذا القانون الخاص بحقول شحنة وحيدة هو ، في حدود علمنا ، قانون كامل ودقيق (في غير ميدان الميكانيك الكوانتي) ، ولكنه يبدو معقداً بعض الشيء . إننا لن ندرس الآن كل الاجزاء ؛ بل نقتصر على تدوينها فقط لتوليد انطباع فقط ، ولبيان أنه يمكن كتابتها ، وبحيث يمكننا أن نرى مقدّماً كيف يكون شكلها على وجه التقريب . وفي الحقيقة ، إن أجدى طريقة لكتابة القوانين الصحيحة في الكهرباء والمغناطيسية ليست الطريقة التي سنتّبعها الآن في كتابتها ، بل تلك التي تتضمن ما يسمى معادلات الحقل ، التي سندرسها في العام القادم . ولكن الرموز الرياضية في هذه المعادلات مختلفة وجديدة ، ولذلك سوف نكتب القانون بصيغة غير ملائمة للحساب ، ولكن برموز نعرفها في الوقت الحاضر . يُعطى الحقل الكهربائي ، **E** ، بالعلاقة التالية :

$$\mathbf{E} = \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{\mathbf{e}_{r'}}{r'^2} + \frac{r'}{c}\frac{d}{dt}\left(\frac{\mathbf{e}_{r'}}{r'^2}\right) + \frac{1}{c^2}\frac{d^2}{dt^2}\,\mathbf{e}_{r'}\right] \qquad (28\text{–}3)$$

بماذا تنبؤنا الحدود المختلفة ؟ لنأخذ الحد الاول $\mathbf{E} = -q\,\mathbf{e}_{r'}/4\pi\varepsilon_0 r'^2$ . إنه طبعاً قانون كولون الذي نعرفه من قبل : q هي الشحنة التي تولد الحقل ؛ $\mathbf{e}_{r'}$ هي متجهة الوحدة في الاتجاه بدءاً من النقطة P حيث يقاس E ، و r′ هي المسافة من P إلى q . ولكن قانون كولون قانون خاطىء . فاكتشافات القرن التاسع عشر أظهرت أنه لا يمكن للتأثيرات أن تنتقل بسرعة أكبر من سرعة أساسية معينة c ، هي التي نسميها الآن سرعة الضوء . إن السبب في بطلان قولنا بأن الحد الأول هو قانون كولون ليس فقط هو عدم إمكان معرفة أين تكون الشحنة حالياً ، وعلى أي بعدٍ هي الآن ، بل أيضاً لأن الشيء الوحيد الذي يمكنه أن يؤثر في الحقل في مكانٍ وزمانٍ معينين هو سلوك الشحنات في الماضي . وإلى أي مدى في الماضي ؟ إن التأخر الزمني ، أو ما يسمى الزمن المتأخر ، هو الزمن اللازم للوصول من الشحنة إلى نقطة الحقل P بسرعة تساوي c . فالتأخر يساوي r′/c .

وعلى هذا ، لكي نأخذ هذا التأخر الزمني بعين الاعتبار ، نضع فتحة صغيرة على r لنبين كم كانت بعيدة عندما تركت المعلومات، التي تصل الآن إلى P ، الشحنة q . لنفترض ، للحظة واحدة فقط ، أن الشحنة تحمل ضوءاً ، وأن هذا الضوء لا يمكنه أن يصل إلى P إلا بالسرعة c . وحينئذ عندما ننظر إلى q ، لن نرى طبعاً أين هي حالياً بل أين كانت في وقت سابق . إن ما هو وارد في صيغتنا هو المنحى الظاهر $\theta_{r'}$ أي المنحى كما كان من قبل ، والمسمى المنحى المتأخر ، وعند المسافة المتأخرة r′ . ولعل ذلك أيضاً من السهولة بما يكفي لفهمه ، ولكنه خاطىء أيضاً . فالأمر كله أشد تعقيداً من ذلك بكثير .

وهناك عدة حدود أخرى . والحد التالي هو كما لو أن الطبيعة تحاول أن تأخذ بعين الاعتبار أن التأثير متأخر ، إذا جاز لنا أن نقول ذلك على نحو تقريبي . إنها توحي بأنه ينبغي علينا أن نحسب حقل كولون المتأخر وأن نضيف إليه تصحيحاً هو جداء معدل تغيره بالزمن المتأخر الذي نستعمله . فكأن الطبيعة تحاول أن تخمن كم سيكون الحقل الحالي في المستقبل ، وذلك بأخذ معدل التغير وضربه بزمن التأخر . ولكننا لما ننته بعد . فهناك حد ثالث — هو المشتق الثاني بالنسبة الى t ، لمتجهة الوحدة في منحى الشحنة . وتكون الصيغة قد اكتملت الآن ، وهذا هو كل ما يتعلق بالحقل الكهربائي المتولد عن شحنة كيفية متحركة .

ويعطى الحقل المغناطيسي بالعلاقة التالية :

$$\mathbf{B} = -\ \mathbf{e}_{r'} \times \mathbf{E}/c \qquad (28-4)$$

ونحن لم نكتب هذا إلا بغية إظهار جمال الطبيعة أو مقدرة الرياضيات . . ونحن لا ندّعي فهم سبب امكان كتابة هذا الشيء الكثير في مثل هذا الحيز الصغير ، ولكن (3 — 28) و (4 — 28) تتضمنان الآلية التي تتبعها المولدات الكهربائية في عملها ، وسلوك الضوء ، وكل ظواهر الكهرباء والمغناطيسية . ولإكمال القصة ، لاشك أننا نحتاج أيضاً الى معرفة شيء عن سلوك المواد المستعملة — أي خواص المادة — التي لا تصفها العلاقة (3 — 28) وصفاً صحيحاً .

ولكي ننهي وصفنا لعالم القرن التاسع عشر ينبغي علينا أن نذكر اندماجاً عظيماً آخر حدث في ذلك القرن ، وهو اندماج كان لمكسويل فيه يد طولى أيضاً ، وهو اندماج ظواهر الحرارة والميكانيك . وسوف ندرس هذا الموضوع قريباً .

إن ما كان ينبغي إضافته في القرن العشرين هو أن قوانين نيوتن في الديناميك

وجدت كلها خاطئة وانه لزم استخدام الميكانيك الكوانتي لتصحيحها. انقوانين نيوتن صحيحة على وجه التقريب عندما يكون سلّم الاشياء كبيراً بما فيه الكفاية. وقوانين الميكانيك الكوانتي هذه، هي وقوانين الكهرباء، لم يتم ائتلافها الا حديثاً لتكوّن مجموعة من القوانين المسماة الإلكتروديناميك الكوانتي.

يضاف الى ذلك، انه اكتُشف عدد من الظواهر الجديدة، كان اولها النشاط الإشعاعي الذي اكتشفه بكرل Becquerel عام ١٨٩٨، أي قبيل انتهاء القرن التاسع عشر. وقد تابع الباحثون دراسة ظاهرة النشاط الإشعاعي هذه حتى أدت هذه الدراسة الى معلوماتنا عن النوى، وعن انواع جديدة من القوى ليست ثقالية ولا كهربائية، وانما هي جسيمات ذات تفاعلات مختلفة، وهو موضوع لا زال مستعصي الحل.

وينبغي أن نقول لأولئك المتزمتين ذوي العلم الغزير (كالاساتذة الذين قد يتفق لهم ان يقرؤوا هذا)، أننا لم نكن دقيقين كل الدقة عندما قلنا إن (3 — 23) هي تعبير كامل عن معلوماتنا في الإلكتروديناميك. فقد كانت هناك مسألة لم تحلّ كما ينبغي في نهاية القرن التاسع عشر، فعندما نحاول حساب الحقل الذي تولده كل الشحنات، بما في ذلك الشحنة نفسها التي نريد أن يؤثر الحقل عليها، فإننا نقع في مشكلة عندما نسعى مثلاً لإيجاد بعد الشحنة عن نفسها، وتقسيم مقدارٍ ما على هذا البعد الذي يساوي الصفر. إن مسألة كيفية معالجة الجزء من هذا الحقل الذي تولده الشحنة ذاتها التي نبغي أن يؤثر الحقل عليها مازالت غير محلولة حتى اليوم. لذلك ندعْ هذا الامر؛ فليس لدينا حل كامل لذلك اللغز حتى الآن ولهذا سوف نتجنب هذا اللغز طالما استطعنا ذلك.

## ٢٨ — ٢ : الإشعاع Radiation

ذلك هو إذن مجمل صورة العالم. فلنستعمله الآن لمناقشة الظواهر التي تسمى

الإشعاع . وللقيام بذلك ينبغي علينا أن نختار من المعادلة ( 3 — 28 ) ذلك الجزء الذي يتغير متناسباً عكساً مع المسافة دون الذي يتغير متناسباً عكساً مع مربع المسافة . وينتهي بنا الأمر الى اننا عندما نجد في النهاية ذلك الجزء فعلاً ، يتبين لنـــا انه من البساطة في صيغته بحيث يكون من المنطقي دراسة الضوء والإلكترودیناميك بطريقة اوليـــة بأن نعتبر ذلك الجزء « قانون » الحقل الكهربائي الذي تولده شحنة متحركة على بعدٍ كبير . وسوف نعتبره إلى حين قانوناً معطىً إلى أن ندرسه بالتفصيل في العام القادم .

ويبدو جلياً ان الحد الأول من الحدود الواردة في المعادلة (3 — 28) يتناسب عكساً مـــع مربع المسافة ، وأن الحد الثاني ليس إلا تصحيحاً للتأخر ، ومن السهل إذن بيان أنهما كليهما يتغيران متناسبين عكساً مع مربع المسافة . وكل الآثار التي تسترعي اهتمامنا مصدرها الحد الثالث الذي هو رغم كل شيء ليس على درجة كبيرة من التعقيد . إن ما ينص عليه هـذا الحد هو : تأمل في الشحنة ولاحظ منحى متجهة الوحدة ( يمكننا إسقاط نهايتها على سطح وحدة الكرة ) . وكلما تنقلت الشحنة تذبذبت متجهة الوحدة فيكون تسارع متجهة الوحدة هذه هو ما نبغيه . وهذا هو كل شيء . وعليه فإن لدينا :

$$\mathbf{E} = \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 c^2}\frac{d^2\mathbf{e}_{r'}}{dt^2} \qquad (28-5)$$

وهذا هو منطوق قوانين الإشعاع ، لأنه هو الحد الوحيد الهام عندما نصبح على بعدٍ كافٍ لأن يجعل تغير الحقول متناسباً عكساً مـع المسافة . ( وتكون الأجزاء التي تتناسب عكساً مع مربع المسافة قد تضاءلت عندئذ إلى حد كبير بحيث لم تعد هامة ) .

ونستطيع الآن أن نذهب إلى أبعد من ذلك قليلاً في دراسة المعادلة (5 — 28) لنرى ماذا تعني . لنفترض أن شحنة تتحرك بأي طريقة كانت وأننا نشاهدها من

مسافة ما. ولنتصور لحظة من الزمن أنها بمعنى من المعاني «اضيئت» (بالرغم من أن الضوء هو ما نسعى إلى تفسيره)؛ ولنتصور أيضاً أنها نقطة صغيرة بيضاء. وحينئذ نرى هذه النقطة البيضاء تتنقل من مكان إلى مكان. ولكننا لا نرى بالضبط كيف تتنقل الآن بالذات، وذلك بسبب التأخر الذي كنا ذكرناه. وما يقام له وزن هو كيف كانت تتحرك في وقت سابق. إن متجهة الوحدة $e_{r'}$ موجهة نحو الموضع الظاهري للشحنة. وترسم نهاية $e_{r'}$ بالطبع منحنياً صغيراً بحيث يكون لتسارعها مركبتان: إحداهما هي الجزء العرضي، لأن نهايته تتحرك إلى الأعلى وإلى الاسفل، والأخرى جزء قطري لأنه يظل على كرة. ومن السهل البرهان على ان الجزء الاخير أصغر كثيراً، وأنه يتغير متناسباً عكساً مع مربع r، حيث r كبير جداً. وهذا أمر يسهل إدراكه، ذلك لاننا حين نتصور أننا نُبعد منبعاً معيناً أكثر فأكثر، فإن تذبذب $e_{r'}$ يبدو أصغر فأصغر متناسباً عكساً مع المسافة؛ ولكن مركبة التسارع القطرية تتغير بأسرع من تناسبها عكساً مع المسافة. وعليه فمن أجل الاغراض العملية، كل ما علينا عمله هو إسقاط الحركة على مستوٍ يبعد بوحدة المسافة. وحينئذ نجد القاعدة التالية: لنتصور أننا ننظر الى الشحنة المتحركة وأن كل شيء نراه متأخر: مثل رسام يحاول رسم منظر على لوحة تبعد وحدة المسافة. إن الرسام الحقيقي لا يأخذ بعين الاعتبار طبعاً أن الضوء يسير بسرعة معينة، بل يرسم العالم كما يراه. وما نبغيه هو أن نرى كيف تبدو صورته. فنحن إذن نرى نقطة تمثل الشحنة تنتقل في الصورة. ويتناسب تسارع هذه النقطة مع الحقل الكهربائي. وهذا هو كل ما نحتاج اليه.

وعلى هذا فإن المعادلة (5 — 28) هي الصيغة الكاملة والمضبوطة للإشعاع؛ حتى أنها تتضمن كل الآثار النسبوية. ولكن يتعين علينا غالباً أن نطبقها على حالة ابسط من ذلك، تتحرك فيها الشحنات مسافة صغيرة بمعدل بطيء نسبياً. ونظراً لأنها تتحرك حركة بطيئة، فإنها لا تبتعد مسافة محسوسة عن نقطة انطلاقها،

بحيث أن زمن التأخر يكون عملياً ثابتاً . وحينئذ يكون القانون أبسط مما كان ، لأن زمن التأخر ثابت . وهكذا نتصور أن الشحنة تقوم بحركة صغيرة جداً على بعد ثابت فعلياً . والتأخر على بعد r يساوي r/c . وعليه فإن قاعدتنا تصبح كما يلي : إذا كان الجسم المشحون يتحرك حركة صغيرة جداً وأزيح جانبياً بالمسافة x (t) ، فإن الزاوية التي تنزاح بها متجهة الوحدة $e_{r'}$ تساوي x/r ، ولما كان r ثابتاً عملياً، فإن المركبة x للمقدار $d^2e_{r'}/dt^2$ ليست إلا تسارع x نفسه في وقت سابق ، ونحصل أخيراً على القانون الذي نريده وهو :

$$E_x(t) = \frac{-q}{4 \pi \varepsilon_0 c^2 r} a_x \left( t - \frac{r}{c} \right) \qquad (28-6)$$

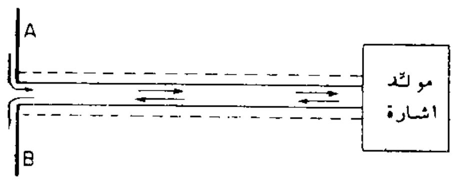
إن المركبة $a_x$ العمودية على خط البصر هي وحدها الهامة . ولنر لماذا كان الأمر كذلك . من الجلي ، أنه إذا كانت الشحنة تتحرك مقبلة ومُدبرة في خط مستقيم نحونا ، فإن متجهة الوحدة لا تتذبذب إطلاقاً في هذا المنحى ، ولا يكون لها تسارع . لذلك فإن الحركة الجانبية هي وحدها الهامة ، وكذلك التسارع الذي نراه مرتسماً على اللوحة .

## ٢٨ — ٣ : المشع ذو القطبين     The dipole radiator

سوف نفترض ان المعادلة ( 6 — 28 ) صحيحة وأنها تعبر عن « القانون » الأساسي للإشعاع الكهرطيسي ، أي أن الحقل الكهربائي الذي تولّده شحنة متسارعة تتحرك حركة غير نسبوية على بعد كبير جداً r يقارب تلك الصيغة . إن الحقل الكهربائي يتغير متناسباً عكساً مع r ، وهو يتناسب مع تسارع الشحنة ، المسقط على « مستوى البصر » ، وهذا التسارع ليس التسارع الحالي بل التسارع الذي كان للشحنة في وقت سابق ، حيث يساوي زمن التأخر المقدار

r/c . وسوف نناقش هذا القانون فيما تبقى من هذا الفصل بحيث نستطيع فهمه فيزيائياً على نحو أفضل ، لاننا مقبلون على استخدامه لفهـــم كل ظواهر انتشار الضوء والراديو ، كالانعكاس والانكسار والتداخل والانعراج والتبعثر . إنه القانون الاساسي وهو كل ما نحتاج إليه . أما كل ما بقي من المعادلة (3 — 28) فما كُتب الا لتهيئة الدراسة بحيث يمكننا أن نتبين أين موقع المعادلة ( 6 — 28 ) فيها و كيف تتم الأمور .

وسوف نتابع مناقشة المعادلة ( 3 — 28 ) في العام المقبل . ولكننا ، في انتظار ذلك ، نسلِّم بأنها صحيحة ، لكن لا على أساس نظري فقط . ونستطيع أن نتصور عدداً من التجارب التي تبين صفة هـذا القانون . ولكي نقوم بذلك ، نحتاج الى شحنة متسارعة . وينبغي أن تكون شحنة وحيدة ، ولكن اذا استطعنا أن نجعل عدداً كبيراً من الشحنات تتحرك كلها معاً بنفس الطريقة ، فإننا نعلم أن الحقل يتكون من مجموع آثار كلٍ من الشحنات منفردة ؛ وليس لنا إلا أن نضيف بعضها إلى بعض . فمثلاً ، لنتأمل في جزءين من سلك موصولين بمولِّد ، كما هو مبين في الشكل (٢٨–١) . والفكرة هي أن المولد يخلق فرقاً في الكمون أو حقلاً يسحب الالكترونات بعيداً عن الجزء A ويدفع بها إلى B




الشكل (٢٨ – ١)

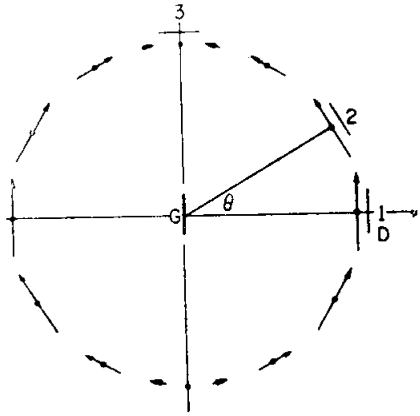
مولّد اشارة ذات تواتر عالٍ ، يحرِّك الشحنات الى الأعلى والى الأسفل على سلكين

في لحظةٍ ما من الزمن ، وبعد زمن غير متناه في الصغر يقوم بعكس ذلك ، فيسحب الالكترونات بعيداً عن B ويعيدها إلى A ! وعلى هذا فإنه يمكن القول أن الشحنات في هذين السلكيْن تكون متسارعة نحو الأعلى في السلك A وكذلك في السلك B في لحظةٍ ما من الزمن ، وفي لحظةٍ تالية تكون متسارعة نحو الأسفل في السلك A وكذلك في السلك B . أما احتياجنا إلى سلكين ومولِّد فليس إلا طريقة لإنجاز الأمر . والنتيجة التي نخلص إليها هي أننا حصلنا على شحنة تتسارع نحو الأعلى ونحو الأسفل كما لو أن السلكين A و B كانا سلكاً واحداً. ويطلق على السلك القصير جداً ، إذا قورن بالمسافة التي يقطعها الضوء في خلال دور اهتزازة واحدة اسم الهزازة الكهربائية ذات القطبين . وهكذا أتيحت لنا الظروف التي نحتاج فيها إلى تطبيق قانوننا الذي يطلعنا على أن هذه الشحنة تولد حقلاً كهربائياً ، ولهذا فنحن نحتاج إلى جهاز يكشف الحقل الكهربائي ، والجهاز الذي نستعمله هو الشيء نفسه ، أي سلكان كالسلكين A و B ! فإذا طُبِّق حقل كهربائي على مثل هذا الجهاز ، فإنه يولِّد قوة تدفع بالالكترونات إلى الأعلى في كلا السلكين أو إلى الأسفل في كليهما . وتكشف هذه الإشارة بواسطة مقوِّم ، يوضع بين A و B ، وسلك صغير دقيق يحمل المعلومات إلى مضخم حيث تُضخَّم الإشارة ، بحيث نستطيع سماع الصوت ذا التواتر المسموع الذي يكيّف به التواتر الراديوي . وعندما تُحس هذه الاداة السابرة بحقل كهربائي ، تحدث ضجيجاً عالياً صادراً من مكبر الصوت ، وعندما لا يؤثر عليها أي حقل كهربائي ينعدم الضجيج .

ولما كانت الغرفة التي نقيس فيها الأمواج تحتوي على أجسام أخرى ، فإن حقلنا الكهربائي يهز الالكترونات في هذه الأجسام ؛ ويجعل الحقلُ الكهربائي هذه الشحنات الأخرى تهتز الى الاعلى والى الاسفل ، فتُحدث بذلك أيضاً تأثيراً على مسبرنا . لذلك فإنه ينبغي علينا للقيام بتجربة ناجحة أن نجعل الاشياء متجاورة تجاوراً شديداً بحيث تصبح تأثيرات الجدران وتأثيرات أجسامنا ، أي

تأثيرات الامواج المنعكسة ، صغيرة نسبياً . وعلى هـــذا فلن تبدو الظواهر متفقة اتفاقاً دقيقاً وكاملاً مع المعادلة ( 6 – 28 ) ، إنما تكون قريبة من ذلك قرباً كافياً لأن يجعلنا قادرين على إدراك القانون إدراكاً كاملاً .

نشغّل المولّد الآن ونسمع الإشارة الصوتية ؛ فنجد حقلاً شديداً عندمـــا يكون الكاشف D موازياً للمولد G عند النقطة 1 في الشكل (٢٨ – ٢) . ونجد




الشكل ( ٢٨ – ٢ )

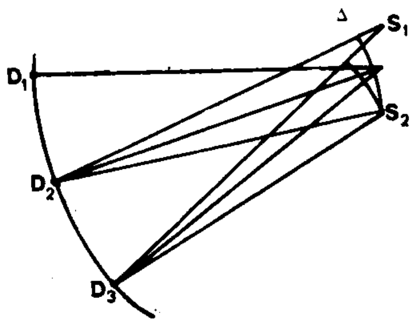
الحقل الكهربائي الآني على كرة يقع مركزها عند
شحنة محدودة في المكان ، تهتز اهتزازاً خطياً

قيمة الحقل نفسها أيضاً عند أي زاوية سمت أخرى حول محور G ، إذ ليس للحقل آثار متجهة . ومن جهة أخرى ، عندما يكون الكاشف في الوضع 3 ، يكون الحقل منعدماً . هذا حسن ، لأن صيغتنا تقول بأنه ينبغي أن يكون الحقل متناسباً مع مسقط تسارع الشحنة على خط عمودي على خط البصر . لذلك عندما ننظر إلى الأسفل نحو G ، تكون الشحنة في حركتها مقتربة من D ومبتعدة عنه ، ولا يكون هناك أي أثر . وهذا يحقق القاعدة الأولى بأنه لا يكون هناك أثر عندما تكون حركة الشحنة باتجاهنا مباشرة . كذلك فإن الصيغة تقول

بأنه ينبغي أن يكون الحقل الكهربائي عمودياً على r وأن يقع في مستوي G و r ؛ وعلى هذا إذا وضعنا الكاشف D عند 1 ، ولكن أدرناه بـ 90 درجة ، فإنه ينبغي ألا نحصل على أية إشارة . وهـــذا هو ما نجده تماماً ، فالحقل الكهربائي شاقولي فعلاً وليس أفقياً . وعندما نحرك D بزاوية متوسطة ، نجد أن أقوى الإشارات تحدث عندما يكون الكاشف موجهاً كما هو مبين في الشكل ، ذلك لأنه بالرغم من أن G شاقولي ، فهو لا يولد حقلاً موازياً لنفسه تماماً ، فمسقط التسارع على خط عمودي على خط البصر هو المقدار الهام . وتكون الإشارة في الوضع 2 أضعف منها في 1 ، بسبب أثر الإسقاط .

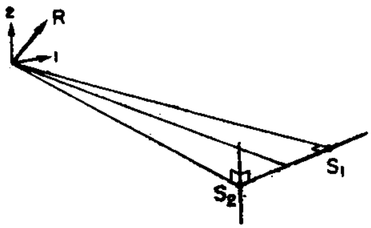
## ٢٨ ـــ ٤ : التداخل Interference

لنختبر بعد هـذا ما يحدث عندما يكون لدينا جنباً إلى جنب منبعان تفصل بينهما مسافة تساوي بضعة سنتمترات ، انظر الشكل ( ٢٨–٣ ) . والقانون هو أنه ينبغي ان تجمع آثار المنبعين عند النقطة 1 عندما يكونان كلاهما موصولين بالمولد نفسه ، ومتحركين إلى الأعلى وإلى الاسفل بطريقة واحدة ، بحيث يكون الحقل الكهربائي الكلي مساوياً لمجموع الحقلين أي ضعف شدته التي كان عليها قبل ذلك .




الشكل ( ٢٨ – ٣ )
ايضاح التداخل بين منبعين ، المنظر كما يبدو من الأعلى

ونأتي الآن إلى إمكانية هامة . نفترض أننا جعلنا الشحنات في كل من $S_1$ و $S_2$ تتسارع إلى الاعلى وإلى الأسفل ولكننا جعلنا $S_2$ يتأخر بحيث يختلف طوره بمقدار $180°$ عن طور $S_1$ . فالحقل الذي يولده $S_1$ يكون في اتجاه ، والحقل الذي يولده $S_2$ يكون في اتجاه معاكس لذلك الاتجاه في أية لحظة من الزمن ، فينبغي ألا نحصل حينئذ على أي أثر في النقطة 1 . ويمكن ضبط طور الاهتزازة بواسطة الانبوب الذي يحمل الاشارة الى $S_2$ . فبتغيير طول هذا الأنبوب نغير الزمن الذي تستغرقه الاشارة للوصول الى $S_2$ ، فنغير بذلك طور تلك الاهتزازة . ويمكننا بضبط هذا الطول أن نجد بالفعل مكاناً لا أثر فيه للإشارة ، بالرغم من أن كلا المنبعين $S_1$ و $S_2$ يتحركان! ويمكن التحقق من أنهما كليهما يتحركان، إذ لو أوقفنا أحدهما عن العمل ، فإنه يمكننا رؤية حركة الآخر. وعليه فإنه يمكن لكليهما معاً أن يولد إشارة منعدمة إذا ضبط كل شيء ضبطاً صحيحاً .




الشكل ( ٢٨ — ٤ )
إيضاح الخاصة المتجهة في تركيب منبعين

ومن المهم جداً أن نبين الآن أن جمع حقلين هو في الحقيقة جمع متّجه . وقد تأكدنا من ذلك منذ قليل من أجل حركة تتم الى الاعلى والى الاسفل ، ولكن لنتحققْ من ذلك في حالة منحيَيْن غير متوازيين . نعيد أولاً المنبعين $S_1$ و $S_2$ الى الطور نفسه ، أي نعيدهما الى التحرك معاً . ولكننا ندير بعد ذلك $S_1$ بـ $90°$ ، كما هو مبين في الشكل (٢٨—٤). لدينا الآن عند النقطة 1 مجموع أثرين ، أحدهما

شاقولي والآخر أفقي . والحقل الكهربائي هو المجموع المتّجه لهاتين الإشارتين المتفقتين في الطور ، أي أن كلتيهما تكونان شديدتين في وقت واحد وتنعدمان معاً في وقت واحد ؛ فالحقل الكلي ينبغي أن يكون إشارةً R مائلة بمقدار 45° . فإذا دوّرنا الكاشف D ليلتقط الضجيج الأعظم ، فإنه ينبغي أن يكون مائلاً بمقدار 45° لا أن يكون شاقولياً . وإذا دورناه بزاوية قائمة بدءاً من ذلك المنحى ، فإنه ينبغي أن نحصل على إشارة منعدمة من السهل قياسها . ومثل هذا السلوك هو ما نشاهده فعلاً .

والآن ، ما شأن التأخر ؟ كيف يمكننا بيان أن الاشارة قد تأخرت ؟ إن باستطاعتنا أن نقيس الزمن الذي وصلت فيه الإشارة باستعمال عدد كبير من الأجهزة ، ولكن هناك طريقة أخرى بسيطة جداً . لنعد مرة أخرى إلى الشكل (٢٨-٣) ، ولنفترض أن $S_1$ و $S_2$ متفقان في الطور . إنهما كليهما يهتزان معاً ويولدان حقلين كهربائيين متساويين في النقطة 1 . ولكنْ لنفترض أننا انتقلنا الى مكانٍ ما 2 أقرب الى $S_2$ منه الى $S_1$ وحينئذ ، بالاستناد إلى المبدأ القائل بأن التسارع ينبغي أن يتأخر بمقدار يساوي $r/c$ إذا كان التأخران غير متساويين ، فإن الإشارتين لا تعودان متفقتين في الطور . وعلى هذا ينبغي أن يكون من الممكن أن نجد وضعاً يكون فيـــه بعدا الكاشف D عن $S_1$ و $S_2$ مختلفين بمقدارٍ ما $\Delta$ يجعل الإشارة منعدمة . أي ينبغي أن تكون المسافة $\Delta$ مساوية المسافة التي يقطعهـا الضوء خلال نصف اهتزازة من اهتزازات المولد . ويمكننا أن نمضي الى أبعد من ذلك ونجد نقطة يكون فيها الفرق $\Delta$ معادلاً لاهتزازة كاملة ؛ بحيث تصل الاشارة الصادرة من الهوائي الأول إلى النقطة 3 متأخرة في الزمن بمقدار يزيد عن تأخر الإشارة الصادرة من الهوائي الثاني بما يساوي تماماً طول الزمن الذي يستغرقه التيار الكهربائي للقيام باهتزازة واحدة ، وحينئذ يكون الحقلان الكهربائيان المتولدان عند 3 متفقين في الطور مرة أخرى . وتعود الاشارة فتصبح شديدة في النقطة 3 .

إن هذا يُكمّل مناقشتنا للاختبار التجريبي لبعض المقوّمات الهامة المعادلة (6 — 28) . وبالطبع ، نحن لم نختبر فعلاً أن شدة الحقل الكهربائي تتناسب مع 1/r ، كما لم نختبر أن هناك حقلاً مغناطيسياً يصاحب الحقل الكهربائي . إذ أن القيام بذلك يتطلب طرائق معقدة ، ويكاد لا يضيف شيئاً إلى معلوماتنا في هذه المرحلة . وعلى كل حال ، فإننا اختبرنا تلك المقومات التي لها الأهمية الكبرى بالنسبة الى تطبيقاتنا التي ستأتي فيما بعد ، وسوف نعود الى دراسة بعض الخواص الأخرى للأمواج الكهرطيسية في العام المقبل .

* * *

## مسائل و تمارين

٢٨ - ١ : فسر المسألتين التاليتين تفسيراً هندسياً باستخدام الأعداد العقدية ، ومن ثم أوجد القيمة المطلقة $|A|$ في كل حالة :

(أ) $$A = re^{i\theta/2} + re^{-i\theta/2}$$

(ب) $$A = \sum_{n=0}^{N} re^{in\theta}$$

* * *

# الفصل التاسع والعشرون

## التداخل

Interference

### ٢٩ ـ ١ : الامواج الكهرطيسية electromagnetic waves

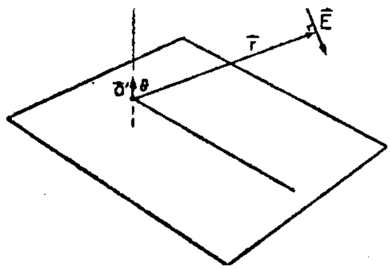
سوف نناقش في هذا الفصل موضوع الفصل السابق مناقشة ذات محتوى رياضي أعمق . لقد بيّنا بشكل وصفي أن هناك نهايات عظمى ونهايات صغرى في حقل الاشعاع الصادر من منبعين ، والمسألة الآن هي أن نعبر عن الحقل تعبيراً رياضياً لا تعبيراً وصفياً فحسب .

لقدسبق أن حلّلنا معنىالصيغة (6 — 28) فيزيائياً على نحو مُرضٍ ، ولكن هناك بضع نقاط ينبغي إيضاحها رياضياً . ويأتي في المقام الأول أنه إذا كانت هناك شحنة متسارعة إلى الأعلى وإلى الأسفل ، وفق خط ما ، في حركة ذات سعة صغيرة جداً ، فإن الحقل في منحى ، بينه وبين محور الحركة زاوية $\theta$ ، يكون منحاه متعامداً مع خط البصر وواقعاً في المستوي الذي يحتوي على التسارع وعلى خط البصر معاً كما في الشكل ( ٢٩ – ١ ) . فإذا سميت المسافة $r$ فإن قيمة الحقل الكهربائي في الزمن $t$ تساوي :

$$E(t) = \frac{-qa\,(t - r/c)\sin\theta}{4\pi\varepsilon_0 c^2 r} \qquad (29\text{-}1)$$

حيث $a(t - r/c)$ هو التسارع في الزمن $(t - r/c)$ ، والمسمى التسارع المتأخر .

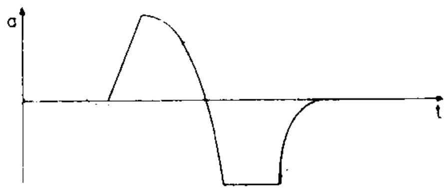
ولعل من المهم الآن أن نرسم صورة للحقل في ظروف مختلفة . والشيء الهام طبعاً هو العامل $a(t - r/c)$ ؛ ولكي ندرك ذلك يمكننا النظر في أبسط



الشكل ( ٢٩-١ )

الحقل الكهربائي **E** العائد الى شحنة موجبة ذات تسارع متأخر **a'**

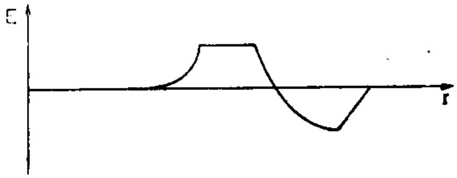
الحالات ، عندما $\theta = 90°$ ، ورسم الحقل بيانياً . إن ما كنا نفكر فيه من قبل هو أن نقف في مكانٍ ما ، ونسأل كيف يتغير الحقل فيه مع الزمن . ولكننا ، عوضاً عن ذلك ، سوف نرى كيف يبدو الحقل في مواضع مختلفة من المكان في لحظة معطاة . وعلى هذا فإن ما نبغيه هو صورة « خاطفة » تطلعنا على قيم الحقل في مواضع مختلفة . وهي تتوقف طبعاً على تسارع الشحنة .




الشكل ( ٢٩-٢ )

تسارع شحنة ما بدلالة الزمن

لنفترض أنه كانت للشحنة في البداية حركة خاصة ما : كأن كانت مثلاً ساكنة في البداية ، ثم تسارعت فجأة على نحو ما ، كما هو مبين في الشكل (٢٩ - ٢)، ثم توقفت . عندئذ نقيس الحقل في موضع مختلف بعد برهة وجيزة . وحينئذ يمكننا أن نجزم أن الحقل سوف يبدو كما هو مبين في الشكل (٢٩ - ٣) .




الشكل ( ٢٩ - ٣ )

الحقل الكهربائي كتابع للمكان في وقت لاحق ( باهمال التغير 1/r )

ففي كل نقطة ، يتعين الحقل بتسارع الشحنة في وقت سابق ، وقيمة هذا السبق تساوي التأخر r/c . وتتعين قيمة الحقل في نقاط أبعد فأبعد بالتسارع في أزمان أقدم فأقدم . وعلى هذا فإن المنحني في الشكل (٢٩ - ٣) هو في الحقيقة ، رسم « معكوس » للتسارع كتابع للزمن ؛ وترتبط المسافة مع الزمن بعامل سلمي ثابت c ، نأخذه غالباً مساوياً الواحد . ويُرى هذا بسهولة بأن نأخذ بعين الاعتبار السلوك الرياضي لـ $a\ (t - r/c)$. ومن الواضح أنه إذا أضفنا زمناً صغيراً $\Delta t$ ، فإننا نحصل على القيمة نفسها لـ $a\ (t - r/c)$ التي نحصل عليها فيما لو طرحنا مسافة صغيرة : $\Delta r = - c\, \Delta t$ .

وبعبارة أخرى : إذا أضفنا زمناً صغيراً $\Delta t$ ، يمكننا أن نعيد $a\ (t-r/c)$ إلى قيمتها السابقة باضافة مسافة صغيرة $\Delta r = c\, \Delta t$ . أي أنه كلما مر الزمن ، يتحرك الحقل كموجة منبعثة من المنبع . وهذا هو سبب قولنا أحياناً أن الضوء ينتشر بشكل أمواج . إن هذا يكافىء قولنا أن الحقل متأخر أو قولنا أن الحقل الكهربائي يتحرك نحو الخارج بمرور الزمن .

وهناك حالة خاصة هامة هي عندما تكون الشحنة q متحركة إلى الأعلى وإلى الاسفل بشكل اهتزاز . إن الحالة التي درسناها تجريبياً في الفصل الأخير كانت حالة ، الانزياح x فيها ، في أي زمن t ، يساوي مقداراً ثابتاً $x_0$ ، أي سعة الاهتزازة ، مضروباً بـ $\cos \omega t$ . فالتسارع يساوي إذن :

$$a = -\omega^2 x_0 \cos \omega t = a_0 \cos \omega t \qquad (29-2)$$

حيث $a_0$ هو التسارع الأعظم الذي يساوي $-\omega^2 x_0$ . وبوضع هذه الصيغة في (1 — 29) نجد :

$$E = -q \sin \theta \frac{a_0 \cos \omega (t - r/c)}{4\pi\varepsilon_0 r c^2} \qquad (29-3)$$

والآن ، بإهمال الزاوية θ والعوامل الثابتة ، انظر كيف يبدو ذلك كتابع للمكان أو كتابع الزمان .

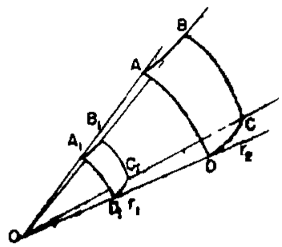
## ٢٩ — ٢ : طاقة الإشعاع

Energy of radiation

إن شدة الحقل في أية لحظة معينة ، أو في أي موضع معين ، تتغير متناسبة عكساً مع المسافة r ، كما ذكرنا سابقاً . وينبغي أن نشير الآن الى أن محتوى طاقة موجة ما ، أو آثار الطاقة التي يمكن أن تكون لحقل كهربائي ، تتناسب مع مربع الحقل ، وذلك لأنه اذا كانت لدينا مثلاً في الحقل الكهربائي شحنة ما أو هزازة ، فإننا إذا أتحنا للحقل أن يؤثر على الهزازة فإنه يجعلها تتحرك . وإذا كانت هذه الهزازة خطية ، فإن التسارع والسرعة والانزياح ، المتولدة من الحقل الكهربائي المؤثر على الشحنة ، تكون كلها متناسبة مع الحقل . وعليه فإن الطاقة الحركية ، التي تتولد في الشحنة ، تكون متناسبة مع مربع الحقل .

إذن سوف نسلّم بأن الطاقة التي يمكن لحقلٍ أن يعطيها إلى جملة ما تتناسب تقريباً مع مربع الحقل .

إن هـذا يعني أن الطاقة التي يمكن للمنبـع ان يعطيها تتناقص كلما ابتعدنا عنه ؛ وهي ، في الحقيقة ، تتغير متناسبة عكساً مع مربـع المسافة . ولكن لهذا الأمر تفسير بسيط جداً : إذا أردنا أن نلتقط كل الطاقة التي يمكن التقاطها من الموجة في داخل مخروط معين على بعدٍ يساوي $r_1$ ، انظر الشكل (٢٩ - ٤)،




الشكل (٢٩ - ٤)

الطاقة المنتشرة داخل المخروط OABCD لاتتوقف
على المسافة r التي يتم عندها قياس الطاقة

وأن نفعل مثل ذلك على بعدٍ آخر يساوي $r_2$ ، فإننا نجد أن كمية الطاقة في وحدة السطح ، في أي موضع ، تتناسب عكساً مع مربـع r . ولكن مساحة السطح المقطوع بالمخروط تتناسب طرداً مـــع مربـع r . إذن فالطاقة التي يمكننا استخلاصها من الموجة ، في داخل زاوية مخروطية معطاة ، هي طاقة ذات قيمة واحدة مهما كان بعدنا ! وبوجه خاص ، فإن الطاقة الكلية التي يمكننا أن نستخلصها من كامل الموجة ، بإحاطتها بهزازات ماصة ، هي طاقة ذات قيمة ثابتة معينة . وعليه فإن القول بأن سعة E تتغير متناسبة مع 1/r يكافىء قولنـا بأن هناك تدفق طاقة لا يضيـع أبداً ، أي طاقةً تستمر في تدفقها وتمتد على

مساحات فعلية متزايدة . وهكذا نرى أنه بعد أن تقوم شحنة بالاهتزاز ، تفقد بعضاً من طاقتها لا يمكنها استرداده بعد ذلك أبداً ؛ وتواصل الطاقة ابتعادهـا أكثر فأكثر دون نقصان . وعلى هذا فإذا كنا على بعد كافٍ بحيث يكون تقريبنا الأساسي على درجة كافية من الصحة ، فإنه لا يمكن للشحنة أن تسترد الطاقة التي شُعّت بعيداً ، وبالطبع فإن الطاقة لا تزال موجودة في مكان ما ، وصالحة لأن تُلتقط من قبل جمل أخرى . وسوف نمضي في دراسة « ضياع » الطاقة هذا في الفصل الثاني الثلاثين .

لننظر الآن بعناية أكبر كيف تتغير الموجة ( 3 – 29 ) كتابع للزمن في مكان معطى ، وكتابع للمكان في زمان معطى ، وذلك بإهمال التغير $1/r$ والثوابت .

## ٢٩ ــ ٣ : الأمواج الجيبية

Sinusoidal waves

لنبدأ بتثبيت الموضع،أي $r$ ، وندرس الحقل كتابع للزمن. وهو حقل مهتز بتواتر زاوي قدره $\omega$ . ويمكن تعريف التواتر الزاوي $\omega$ بأنه معدّل تغير الطور مع الزمن ( ووحدته راديان في الثانية ) . وقد سبق أن درسنا مثل هذا الأمر ، لذلك ينبغي أن يكون مألوفاً لدينا الآن. أما الدور فهو الزمن اللازم لاهتزازة كاملة واحدة ، وقد تطرقنا الى هذا أيضاً، ووجدنا أنه يساوي $2\pi/\omega$، لأن جداء $\omega$ بالدور يساوي اهتزازة كاملة لجيب التمام .

وندخل الآن مقداراً جديداً يستعمل في الفيزياء كثيراً . وهو مـا يتعلق بالحالة المعاكسة التي نثبّت فيها الزمن $t$ ، وننظر في الموجة كتابع للمسافة $r$ . وبالطبع ، نلاحظ أن الموجة ( 3 – 29 ) ، كتابع للمسافة $r$ ، هي أيضاً موجة

مهتزة . أي أنه بغض النظر عن $1/r$ ، الذي نهمل أمره ، نرى أن **E** يهتز كلما تغير المكان . وعليه فإنه يمكننا ، على غرار $\omega$ ، أن نعرّف مقداراً يسمى العدد الموجي ، نرمز اليه بالحرف $k$ . ويُعرّف هذا العدد بأنه معدّل تغير الطور مع المسافة ، ( ووحدته راديان في المتر ) . أي أن الطور يتغير كلما تحركنا في المكان ، والزمنُ ثابت .

وهناك مقدار آخر يقابل الدور، وهو ما يمكن أن نسميه الدور في المكان، ولكنه يسمى عادة طول الموجة ، ويرمز له بالحرف $\lambda$ . وهو المسافة التي تشغلها اهتزازة كاملة . ومن السهل أن نتبين بعد هذا أن طول الموجة يساوي $2\pi/k$ ، ذلك لأن جداء $k$ بطول الموجة هو عدد الراديانات التي يتغير بها الطور ، إذ أنه يساوي معدل تغير الراديانات بالمتر مضروباً بعدد الامتار ، وينبغي أن نحصل على تغير يساوي $2\pi$ لكل اهتزازة واحدة . إذن فالعلاقة $k\lambda = 2\pi$ شبيهة تمام الشبه بالعلاقة $\omega t_0 = 2\pi$ .

والآن ، لدينا في موجتنا الخاصة علاقة محدّدة بين التواتر وطول الموجة ، ولكن تعريف $k$ وتعريف $\omega$ السابقين هما في الواقع تعريفان عامان تماماً . أي أنه يمكن في ظروف فيزيائية أخرى ألا تكون العلاقة بين طول الموجة والتواتر على نفس النحو . وعلى كل حال ، فإن معدل تغير الطور مع المسافة يسهل تعيينه في حالتنا ، إذ لو سمينا الطور $\varnothing = \omega(1 - r/c)$ ، وفاضلنا ( جزئياً ) بالنسبة للمسافة $r$ ، لكان معدل التغير ، $\frac{\partial \varnothing}{\partial r}$ مساوياً :

$$\left|\frac{\partial \varnothing}{\partial r}\right| = k = \frac{\omega}{c} \qquad (29-4)$$

وهناك عدة طرق لتمثيل الشيء نفسه ، مثلاً :

$\lambda\,\nu = c$ (29 — 7) ؛ $\lambda = ct_0$ (29 — 5)

$\omega\,\lambda = 2\pi c$ (29 — 8) ؛ $\omega = ck$ (29 — 6)

وإذا سُئلنا لماذا كان طول الموجة مساوياً جداء c بالدور ؟ فالجواب على ذلك طبعاً سهل جداً ، إذ أننا إذا التزمنا السكون وانتظرنا مرور دور واحد ، فإن الأمواج المنتشرة بالسرعة c ، سوف تقطع مسافة $ct_0$ ، وتكون قد انتقلت طبعاً بمقدار طول موجة واحدة .

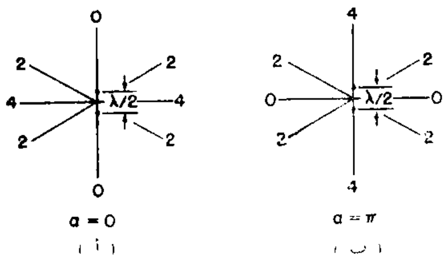
وفي حالة فيزيائية أخرى غير حالة الضوء ، لا تكون k بالضرورة مرتبطة مع ω على هذا النحو البسيط . فإذا رمزنا للمسافة على طول محور ما بالحرف x ، فإن صيغة موجة جيبية ، تتحرك في منحى x وذات عدد موجي k وتواتر زاوي ω ، تكتب بوجه عام بالشكل $\cos(\omega t - kx)$ .

والآن بعد أن أدخلنا فكرة طول الموجة ، يمكننا أن نقول شيئاً إضافياً عن الظروف التي تكون فيها الصيغة ( 1 — 29 ) صيغة صحيحة . لنتذكر أن الحقل مكون من بضعة أجزاء ، أحدها يتغير متناسباً عكساً مع r ، وجزء آخر يتغير متناسباً عكساً مع $r^2$ ، وأجزاء أخرى تتغير تغيراً أسرع من ذلك . وقد يكون من الجدير معرفة الظروف التي يكون فيها الجزء $1/r$ من الحقل أكثر الأجزاء أهمية وتكون فيها سائر الاجزاء صغيرة نسبياً . والجواب هو طبعاً ، « أن نبتعد ، بعداً كافياً » ، إذ أن الحدود التي تتغير متناسبة عكساً مع مربع المسافة تصبح في النهاية مهملة اذا قورنت بالحد $1/r$ . ولكن مامقدار « البعد الكافي » ؟ والجواب غير الكمي هو : أن الحدود الأخرى هي أصغر من الحد المتناسب مع $1/r$ صغراً يتناسب مع $\lambda/r$ . وعلى هذا ، فإن الصيغة ( 1 — 29 ) تؤلف تقريباً ممتازاً للحقل متى أصبحت r أكبر من طول الموجة ببضع مرات . ويطلق أحياناً اسم « منطقة الموجة » على المنطقة التي تبعد أكثر من بضعة أطوال موجية .

## ٢٩ ــ ٤ : المشعات ذوات القطبين

لنناقش الآن الرياضيات المستعملة في تركيب آثار هزازتين لايجاد الحقل الحاصل عند نقطة معطاة . وهذا امر سهل جداً في الحالات القليلة التي نظرنا فيها في الفصل السابق. سندرس الآثار دراسة وصفية أولاً ثم بشكل كمي أكثر. ولنأخذ الحالة البسيطة التي يقع فيها مركزا الهزازتين في المستوي الأفقي نفسه الذي يقع فيه الكاشف ، ويكون فيها خط الاهتزاز شاقولياً .

إن الشكل [ ٢٩ - ٥ (أ) ] ، يمثل منظر مثل هاتين الهزازتين كما يُرى من الأعلى . وتبعد الواحدة منها عن الأخرى ، في هذا المثال الخاص ، بعداً يساوي




الشكل (٢٩ - ٥)

The intensities in various direction from two dipole oscillators

الشدات في مناحٍ مختلفة من هزازتين ، كل منها ذات قطبين ، وتبعد إحداهما عن الاخرى بمقدار نصف طول الموجة .
على اليسار : اتفاق في الطور ($\alpha = 0$)
على اليمين : اختلاف في الطور يقابل نصف الدور ($\alpha = \pi$)

نصف طول الموجة في منحى شمالي جنوبي ، وتهتزان معاً بطور واحد نسميه طور الصفر . ونود الآن معرفة شدة الإشعاع في مناحٍ مختلفة . ونعني بالشدة كمية الطاقة التي ينقلها الحقل عبرنا في ثانية واحدة ، وهي كمية تتناسب مع

مربع القيمة الوسطية للحقل خلال الزمن . وعلى هذا ، فإن ما ينبغي أن ننظر فيه ، عندما نود معرفة مدى سطوع الضوء ، هو مربع الحقل الكهربائي لا الحقل الكهربائي نفسه . ( إن الحقل الكهربائي يدل على شدة القوة التي تحس بها شحنة ساكنة ، أما كمية الطاقة العابرة ، مقدرة بالواط لكل متر مربع ، فتتناسب مع مربع الحقل الكهربائي . وسوف نستخرج ثابتة التناسب في الفصل التالي ) . وإذا نظرنا إلى الهزازتين من الجهة الغربية نجد أن كلتيها تُسهمان إسهاماً واحداً وباتفاق في الطور ، وبذلك يكون الحقل الكهربائي أكبر بمرتين مما لو كانت تولده هزازة واحدة . لذلك تكون الشدة أكبر بأربع مرات مما لو كانت هناك هزازة واحدة فقط . (إن الأعداد في الشكل (٢٩-٥) تمثل قيمة الشدة في الحالة المعتبرة بالمقارنة مع ما يمكن أن تكون عليه الشدة فيما لو كانت هناك هزازة واحدة شدتها وحدة الشدة ) . وفي أي من منحيي الشمال والجنوب ، وفق الخط الواصل بين الهزازتين ، يكون بينهما فرق يساوي نصف طول الموجة ، لذلك يكون أثر إحدى الهزازتين مختلفاً في الطور عن أثر الهزازة الأخرى بنصف اهتزازة بالضبط ، فتنتج عن جمع الحقلين حينئذ شدة منعدمة . وتكون الشدة مساوية 2 من أجل زاوية متوسطة معينة ( هي في الحقيقة 30° ) ، وهي تتناقص من 4 إلى 2 إلى الصفر . وعلينا أن نتعلم كيف نجد هذه الأعداد من أجل زوايا أخرى . والمسألة مسألة جمع اهتزازتين مختلفتين في الطور .

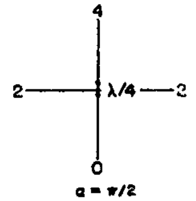
لنلق نظرة سريعة على حالات أخرى ذات شأن . لنفترض أن الهزازتين تفترقان بمقدار نصف طول الموجة ، ولكن الطور α لإحداهما جُعل متأخراً في اهتزازه بمقدار نصف الدور عن الهزازة الأخرى وهي الحالة الظاهرة في الشكل [٢٩-٥(ب)] . فالشدة تكون الآن منعدمة في المنحى الغربي ، لأن إحدى الهزازتين «تدفع» ، بينما الهزازة الأخرى « تشد» . أما في المنحى الشمالي فإن الاشارة الواردة

من الهزازة القريبة تأتي في زمن معين ، وتأتي الاشارة من الهزازة الأخرى بعد ذلك بنصف الدور . ولكن الاشارة الأخيرة كانت في الأصل متأخرة عن الأولى بنصف الدور لذلك فهي الآن متفقة تماماً معها في الطور، وهكذا تبلغ الشدة في هذا المنحى أربع وحدات . وتظل الشدة في المنحى 30° مساوية 2 كما سنثبت ذلك فيما بعد .

ونأتي الآن إلى حالة هامة تُبرز ظاهرة قد تكون مفيدة . لنلاحظ أن أحد أسباب أهمية علاقات الطور بين الهزازات هو توجيه أجهزة إرسال الراديو . فمثلاً ، إذا أنشأنا جملة هوائي وأردنا أن نرسل إشارة راديوية إلى هاواي مثلاً ، فإننا نهيء الهوائيين كما هو مبين في الشكل [ ٢٩ - ٥ (أ) ] ، ونذيع و هوائيانا متفقان في الطور ، لأن هاواي تقع الى الغرب منا . ثم إذا عزمنا في الغد على أن نذيع في اتجاه ألبرتا في كندا ، فنظراً لكونها تقع في الشمال لا في الغرب ، فإن كل ماعلينا القيام به هو أن نعكس طور احد الهوائيَّيْن ، فنستطيع الإذاعة باتجاه الشمال . ويمكننا انشاء جمل هوائيات بترتيبات مختلفة. وجملتنا هي من أبسط الجمل الممكنة؛ وبمقدورنا أن نجعل الجمل أشد تعقيداً بكثير؛ وبتغيير الأطوار في الهوائيات المختلفة يمكننا ارسال الحزم في اتجاهات مختلفة ويمكننا ان نرسل معظم الطاقة في الاتجاه الذي نرغب ان يتم الإرسال وفقه دونما حاجة لتحريك الهوائي ابداً ! ولكنا في كلتا الحالتين السابقتين نضيع جزءاً من الطاقة في اتجاه جزيرة إستر * عندما نذيع في اتجاه ألبرتا ، ومن المهم أن نسأل اذا كان يمكن ارسال الطاقة في اتجاه واحد فقط . وقد نظن لأول وهلة أن النتيجة تكون متناظرة دائماً باستعمال هوائيَيْن

(*) تقع جزيرة Easter في المحيط الهادي قرب شيلي في الجنوب الغربي من كاليفورنيا حيث ألقيت هذه المحاضرات . (المترجمون)

كالسابقين . لننظر إذن في حالة تبدو غير متناظرة وذلك لإظهار التنوع الممكن .

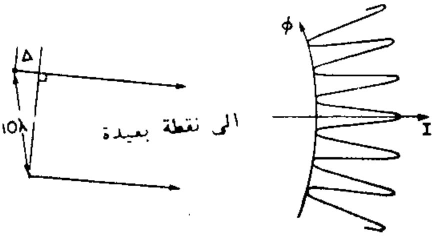



الشكل (٢٩ - ٦)
هوائيان ثنائيا الأقطاب يصدران
طاقة عظمى في اتجاه واحد

إذا كان الهوائيان يفترقان بربع طول الموجة، وكان الهوائي الشمالي متأخراً في الزمن عن الهوائي الجنوبي بربع الدور ، فما الذي يحدث حينئذ في الشكل (٢٩- ٦) ? . إننا نحصل في الاتجاه الغربي على 2 كما سنرى فيما بعد . أما في الاتجاه الجنوبي فتكون الاشارة معدومة ، لأن الاشارة الآتية من الهوائي الجنوبي S تصل في لحظة ما ؛ وتصل الإشارة من الهوائي الشمالي N متأخرة في الطور بمقدار 90° ، ولكنها في الأصل متأخرة بمقدار 90° بحكم بنية طورها ، لذلك فإنها تصل متأخرة بمقدار 180° إجمالاً ، فلا يكون هناك أي أثر . ومن جهة أخرى ، ففي الاتجاه الشمالي ، تصل الإشارة من N قبل الإشارة الآتية من S متقدمة بمقدار 90° ، لأنها أقرب بمقدار ربع طول الموجة. ولكن طورها أعد بحيث يكون اهتزازها متأخراً بمقدار 90° ، وهذا مايكافىء تماماً مقدار تقدمها ، لذلك تظهر الإشارتان متفقتين معاً في الطور ، مما يزيد شدة الحقل إلى الضعف والطاقة إلى أربعة أضعاف .

وهكذا ، باستعمال شيء من البراعة في تحديد أمكنة الهوائيات وأطوارها ، يمكننا إرسال الطاقة كلها في اتجاه واحد . ولكنها تظل موزعة على مجال كبير

من الزوايا . فهل باستطاعتنا أن نرتب الأمر بحيث تكون مركّزة في اتجاه خاص بشكل أدق بكثير مما سبق ؟ لننظر مرة أخرى في حالة الإرسال إلى هاواي ، حيث نرسل الحزمة شرقاً وغرباً ولكنها تكون موزعة على زاوية كبيرة ، إذ أننا لا نحصل حتى من أجل الزاوية 30° إلا على نصف الشدة ، أي أننا نضيع الطاقة . فهل باستطاعتنا أن نفعل أفضل من ذلك؟لننظر في حالة تكون فيها المسافة الفاصلة مساوية عشرة أطوال موجية، انظر الشكل ( ٢٩ — ٧ ) ، وهي حالة أكثر شبهاً بالحالة التي اختبرناها في الفصل السابق ، ولكن بفواصل تبلغ بضعة أطوال موجية بدلاً من كسرٍ صغير من طول الموجة . فتكون الصورة هنا مختلفة اختلافاً بينا .

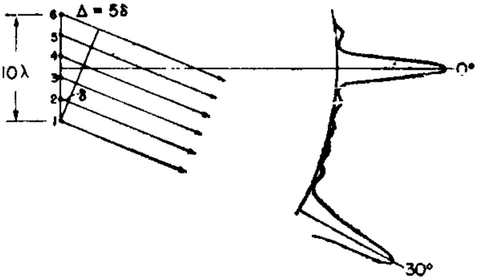



الشكل (٢٩ - ٧)

نمط الشدة من أجل زوجين كل زوج منها ذو قطبين ، والمسافة الفاصلة بينهما تساوي λ 10

إذا كانت تفصل بين الهزازتين مسافة عشرة أطوال موجية ( نأخذ حالة الاتفاق في الطور لتيسير الأمر ) ، فإننا نرى أنهما تكونان على وفاق في الاتجاه الشرقي الغربي ، ونحصل على شدة كبيرة ، أي أربعة أضعاف ما نحصل عليه فيما لو كانت إحدى الهزازتين تعمل وحدها فقط . ومن جهة أخرى ،فإنه من أجل اتجاه يميل بزاوية صغيرة جداً على الاتجاه السابق ، يكون زمنا وصول الاشارتين مختلفين بما يكافىء فرقاً في الطور قدره 180° ، فتكون الشدة منعدمة . وبعبارة

أدق ، إذا رسمنا خطاً من كل من الهزازتين إلى نقطة بعيدة ، وكان الفرق Δ بين المسافتين مساوياً $\lambda/2$ ، أي نصف اهتزازة ، فإن الاشارتين تكونان متعاكستين في الطور . إذن فهذا الانعدام الاول يتم عندما يحدث ذلك . ( لم يرسم الشكل بقياسات نسبية مضبوطة بل على نحو تقريبي ) . إن هذا يعني أننا نحصل بالفعل على حزمة ضيقة جداً في الاتجاه المطلوب ، إذ لو انزحنا عن هذا الاتجاه انزياحاً صغيراً لفقدنا كل شدتنا . ولكن لسوء حظ الاغراض العملية ، إذا نحن فكرنا في إنشاء إذاعة راديوية ، وضاعفنا المسافة السابقة Δ ، فإن فرق الطور يساوي حينئذ اهتزازة كاملة ، وهذا يكافىء تماماً العودة إلى الاتفاق في الطور ! وهكذا نحصل على عدة نهايات عظمى ونهايات صغرى متعاقبة .




الشكل (٢٩ — ٨)
جملة مؤلفة من ستة هوائيات ، كل منها ذو قطبين
وإلى جانبها جزء من نمط شدتها

والآن كيف يمكن ترتيب الامر للتخلص من كل هذه النهايات العظمى الزائدة ، أو هذه « الفصوص » كما تسمى ؟ إنه يمكننا التخلص مما هو غير مرغوب فيه منها بطريقة حاذقة حقاً . لنفترض أننا وضعنا مجموعة أخرى من الهوائيات بين الهوائيين اللذين كانا لدينا . أي أن المسافة بين الهوائيين الطرفيين تظل $10\lambda$ كما كانت ، ولكننا نضع بينهما هوائيات تفصل بين كل اثنين

متجاورين منها مسافة $2\lambda$ مثلاً ، ونجعل الهوائيات كلها تعمل متفقة في الطور . لدينا الآن ستة هوائيات ، وإذا نظرنا إلى الشدة في المنحى الشرقي الغربي ، وجدنا أن هذه الشدة أكبر طبعاً بكثير منهـا في حالة هوائي واحد . فالحقل يبلغ ستة أضعاف والشدة ستة وثلاثين ضعفاً ، أي مربع الحقل . ونحصل في هذا المنحى على ست وثلاثين وحدة من وحدات الشدة . وإذا نظرنا الآن إلى النقاط المجاورة للشدة العظمى ، وجدنا الشدة منعدمة كما سبق تقريباً ، ولكن إذا ابتعدنا إلى حيث كنا نجد « نتوءاً » كبيراً ، فإننا نجد الآن « نتوءاً » أصغر منه بكثير. دعنا نرى كيف يحدث ذلك .

إن السبب في أننا لا نجد نتوءاً كبيراً حيث نتوقع أن يكون عندما تساوي المسافة $\Delta$ طولاً موجياً تماماً هو ما يلي : صحيح أن ذا القطبين 1 وذا القطبين 6 متفقان في الطور ويتعاونان في السعي لتوليد شدة ما في ذلك المنحى ، غير أن الهوائيين 3 و 4 متعاكسان تقريباً في الطور مع الهوائيين 1 و 6 ، وبالرغم من أن 1 و 6 يتعاونان ، وأن 3 و 4 يتعاونان أيضاً ، فإن الأخيرين يعاكسان الأولين في الطور تقريباً . لذلك كانت هناك شدة صغيرة جداً في ذلك المنحى ، فهناك إذن شيء من الشدة ، إذ لا يحدث تعاكس تام . ويستمر حدوث مثل هذا الأمر ؛ ونحصل على نتوءات صغيرة جداً . وتكون الحزمة الشديدة في الاتجاه الذي نرغب أن تكون فيه . ولكن شيئاً آخر يحدث في هذا المثال الخاص : وهو أنه ما دامت المسافة بين كل ذي قطبين والذي يليه تساوي $2\lambda$ ، فإن من الممكن أن نجد زاوية تكون من أجلها المسافة بين ذوي قطبين متجاورين مساوية طولاً موجياً بالضبط ، بحيث تكون آثار كل الهوائيات متفقة في الطور مرة أخرى . فكل هوائي يتأخر عن المجاور له بـ $360°$ ، بحيث تعود كل الهوائيات متفقة في الطور ، ونحصل على حزمة شديدة ثانية في ذلك المنحى ! ومن السهل تجنب ذلك عملياً بجعل المسافة الفاصلة بين هوائيين متجاورين أصغر

من طول الموجة . فإذا وضعنا عدداً أكبر من الهوائيات بحيث يكون البعد بين كل اثنين متجاورين أقل من طول الموجة ، فإن ذلك الأمر لا يحدث حينئذ . أما إمكان حدوث ذلك من أجل زوايا معينة عندما تكون المسافة الفاصلة أكبر من طول الموجة ، فهو ظاهرة على قدر كبير من الأهمية والفائدة في تطبيقات أخرى ، لا في حقل الاذاعة في الراديو بل في شبكات الانعراج . diffraction gratings

## ٢٩ — ٥ : رياضيات التداخل The mathematics of interference

لقد أنهينا الآن تحليلنا الوصفي لظواهر المشعات ذوات القطبين ، وينبغي علينا أن نتعلم كيف نحللها كمياً . فلإيجاد أثر منبعين في منحىً ما معين ، في أعم الحالات ، حين يكون بين الهزازتين نفسيهما فرق في الطور يساوي $\alpha$ ، وتكون سعتاهما $A_1$ و $A_2$ غير متساويتين ، نرى أن علينا أن نجمع تابعين جيبيين لهما التواتر نفسه ولكن طوريهما مختلفان . ومن السهل إيجاد فرق الطور بين هذين التابعين ؛ فهو يتألف من تأخر سببه الفرق في المسافة ، ومن تأخر خاص بالهزازتين سببه بنية الطور فيهما . ومن الوجهة الرياضية ، علينا إيجاد المجموع R لموجتين : $R = A_1 \cos(\omega t + \Phi_1) + A_2 \cos(\omega t + \Phi_2)$ فكيف نقوم بذلك ؟

إن هذا أمر سهل حقاً ، ونسلّم أننا نعرف من قبل كيف نقوم به . ومع ذلك فإننا نشرح الطريقة ببعض التفصيل . وإذا كنا ماهرين في الرياضيات ونعرف ما يكفي عن الجيوب وجيوب التمام ، فإننا نستطيع أن نقوم بالأمر بيُسر . وأيسر الحالات تلك التي تكون فيها السعتان $A_1$ و $A_2$ متساويتين ، ولنقل بأن كلاً منهما تساوي A . ففي ظل هذه الشروط يكون لدينا مايلي : ( ويمكننا تسمية هذه الطريقة بالطريقة المثلثاتية لحل المسألة . )

$$R = A\,[\cos(\omega t + \Phi_1) + \cos(\omega t + \Phi_2)] \qquad (29-9)$$

ولا بد أننا تعلّمنا مرة في درس المثلثات القاعدة التالية :

$$\cos A + \cos B = 2 \cos \frac{A-B}{2} \cos \frac{A+B}{2} \qquad (29-10)$$

فإذا كنا نعرف ذلك ، أمكننا أن نكتب مباشرة صيغة R كما يلي :

$$R = 2 A \cos \frac{1}{2} (\Phi_1 - \Phi_2) \cos \left( \omega t + \frac{1}{2} \Phi_1 + \frac{1}{2} \Phi_2 \right) \qquad (29-11)$$

وهكذا نجد أن لدينا موجة اهتزازية ذات طور جديد وسعة جديدة .

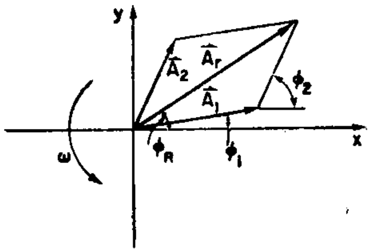
والنتيجة بوجه عام هي موجة اهتزازية ذات سعة جديدة $A_R$ ، بفرق طور $\Phi_R$ يسمى الطور الحاصل . في ضوء ذلك ، تكون النتيجة في حالتنا الخاصة كما يلي ، فالسعة الحاصلة تساوي :

$$A_R = 2 A \cos \frac{1}{2} (\Phi_1 - \Phi_2) \qquad (29-12)$$

أما الطور الحاصل فيساوي وسطي الطورين ، وبذلك نكون قد حللنا المسألة حلاً كاملاً .

لنفترض الآن أننا لانستطيع أن نتذكر ان مجموع جيبي التام لزاويتين يساوي جداء جيب التام لنصف مجموعها بجيب التام لنصف الفرق بينهما ، فإنه يمكننا حينئذ أن نستعمل طريقة أخرى في التحليل ذات محتوى هندسي أعمق . إن أي جيب تمام تابع لـ $\omega t$ يمكن اعتباره مسقطاً أفقياً لمتّجهة دوارة . لنفترض أن هناك متجهة $A_1$ طولها $A_1$ تدور مع الزمن بحيث تصنع مع المحور الأفقي زاوية تساوي $\omega t + \Phi_1$ . ( سوف نسقط المقدار $\omega t$ بعد قليل ، فنرى عندئذ أن لاتأثير له ) . نفترض أننا نلتقط صورة خاطفة في اللحظة $t = o$ ،على الرغم من أن الشكل يدور فعلاً بسرعةزاوية $\omega$ ،انظر الشكل(٢٩-٩) . إن مسقط $A_1$

على المحور الأفقي يساوي بالضبط $A_1 \cos(\omega t + \Phi_1)$ . وفي اللحظة $t = o$ ،




الشكل ( ٢٩ - ٩ )

طريقة هندسية لتركيب موجتين جيبيتين . ينظر الى المخطط على أنه كله يدور بعكس دوران عقارب الساعة بتواتر زاوي ω

يمكن تمثيل الموجة الثانية بمتجهة اخرى $\mathbf{A_2}$ طولها $A_2$ وزاويتها مع المحور $\Phi_2$ ، تدور ، كالمتجهة الأولى ، بالسرعة الزاوية نفسها ω ، لذلك فالوضعان النسبيان للمتجهتين ثابتان . والجملة تدور كأنها جسم واحد صلد . والمسقط الأفقي للمتجهة $\mathbf{A_2}$ يساوي $A_2 \cos(\omega t + \Phi_2)$ . ولكننا نعرف من نظرية المتجهات أننا اذا جمعنا المتجهتين بالطريقة المألوفة ، أي وفقاً لقاعدة متوازي الأضلاع ، ورسمنا المتجهة الحاصلة $\mathbf{A_R}$ ، فإن المركبة الأفقية x للحاصلة تساوي مجموع المركبتين الأفقيتين للمتجهتين الأخريين . وبذلك تكون مسألتنا قد حُلّت . ومن السهل التحقق أن ذلك يعطينا النتيجة المضبوطة في الحالة الخاصة التي عالجناها فيما سبق ، حيث $A_1 = A_2 = A$ .ففي هذه الحالة ، نرى من الشكل (٢٩ - ٩) أن $A_R$ تقع في المنتصف ما بين $A_1$ و $A_2$ وتصنع زاوية مقدارها $\frac{1}{2}(\Phi_2 - \Phi_1)$ مع كل منهما . وعلى هذا نجد $A_R = 2A \cos \frac{1}{2}(\Phi_2 - \Phi_1)$ كما ذكرنا من قبل. كذلك يتبين لنا من المثلث أن طور $A_R$ ، في دورانها ، يساوي الوسط الحسابي لزاويتي المتجهتين $A_1$ و $A_2$ عندما تكون السعتان متساويتين . وواضح أنه يمكننا

أيضاً بالسهولة نفسها أن نحل المسألة في الحالة التي تكون فيها السعتان غير متساويتين . ونسمي هذه الطريقة الطريقة الهندسية لحل المسألة .

وهناك أيضاً طريقة أخرى لحل المسألة وهي الطريقة التحليلية . وهي طريقة نستعيض فيها عن أن نرسم فعلياً صورة كالتي يبينها الشكل (٢٩ - ٩) ، بأن نكتب شيئاً ينطق بما تنبىء به الصورة : فعوضاً عن رسم المتجهات ، نكتب عدداً عقدياً يمثل كلاً من المتجهات ، والقيم الحقيقية للأعداد العقدية هي المقادير الفيزيائية الفعلية . وعلى هذا يمكننا في الحالة الخاصة التي نظرنا فيها أن نعبر عن الموجتين كما يلي : $A_1 e^{i(\omega t+\Phi_1)}$ [ الجزء الحقيقي في هذه العبارة هو $A_1 \cos(\omega t+\Phi_1)$ ] و $A_2 e^{i(\omega t+\Phi_2)}$ . ويمكننا الآن جمع الموجتين :

$$R = A_1 e^{i(\omega t+\Phi_1)} + A_2 e^{i(\omega t+\Phi_2)} = (A_1 e^{i\Phi_1} + A_2 e^{i\Phi_2})\, e^{i\omega t} \quad (29-13)$$

أو :

$$\hat{R} = A_1 e^{i\Phi_1} + A_2 e^{i\Phi_2} = A_R\, e^{i\Phi_R} \quad (29-14)$$

وهذا هو حل المسألة التي نرغب في حلها ، لأنه يمثل النتيجة في شكل عدد عقدي مقداره $A_R$ وطوره $\Phi_R$ .

ولرؤية كيف يتم العمل بهذه الطريقة ، دعنا نجد السعة $A_R$ التي هي «طول» $\hat{R}$ . وللحصول على « طول » كمية عقدية ، نضرب دائماً الكمية بمرافقها العقدي ، فهذا الجداء يعطي مربع الطول . والمرافق العقدي العبارة نفسها ، إنما تكون اشارة i فيه معاكسة . وعليه يكون لدينا :

$$A_R^2 = (A_1 e^{i\Phi_1} + A_2 e^{i\Phi_2})\,(A_1 e^{-i\Phi_1} + A_2 e^{-i\Phi_2}) \quad (29-15)$$

وبإجراء الضرب نحصل على $A_1^2 + A_2^2$ ( أما عبارات e فيفني بعضها بعضاً ) ، ويكون لدينا من أجل الحدود الهجينة :

$$A_1A_2 \left( e^{i(\Phi_1-\Phi_2)} + e^{i(\Phi_2-\Phi_1)} \right)$$

ولكن $e^{i\theta}+ e^{-i\theta} = \cos\theta + i \sin\theta + \cos\theta - i \sin\theta$

أي أن : $e^{i\theta}+ e^{-i\theta} = 2 \cos\theta$

وتكون النتيجة النهائية كما يلي :

$$A_R^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1A_2 \cos ( \Phi_2-\Phi_1 ) \qquad (29-16)$$

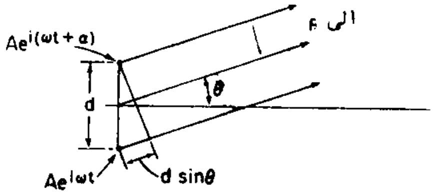
وهـــذا ، كما نرى ، يتفق مع طول $A_R$ في الشكل (٢٩ - ٩)،باستعمال قواعد المثلثات .

يتبين لنا اذن أن لمجموع الأثرين شدة تساوي الشدة $A_1^2$ التي نحصل عليها في حالة إحدى الموجتين وحدها مضافاً إليها الشدة $A_2^2$ التي نحصل عليها في حالة الموجة الأخرى وحدها مضافاً إليهما حد تصحيحي . ويسمى هذا التصحيح باسم أثر التداخل . وفي الحقيقة ، ليس هذا التصحيح إلا الفرق بين ما نحصل عليه بجمع الشدتين فقط وبـين مـا يحدث فعلاً . ونسمي ذلك تداخلاً سواءً أكان موجباً أم سالباً . (إن التداخل في اللغة الدارجة يعني عادةمعاكسة أو إعاقة، ولكننا في الغالب لانستعمل في الفيزياء اللغة بالشكل الذي تعنيه في الأصل !).

فإذا كان حد التداخل موجباً ، سمينا تلك الحالة تداخلاً بنّـاءً ، مع أن وصف التداخل بأنه بنّـاء قد يبدو نابياً للناس جميعاًإلا للفيزيائيين ! وتسمى الحالة المعاكسة تداخلاً هدّاماً .

لنر الآن كيف نطبق صيغتنا العامة ( 16-29 ) المتعلقة بهزازتين على

الحالات الخاصة التي ناقشناها مناقشة وصفية . إن تطبيق هذه الصيغة العامـة يستدعي فقط إيجاد فرق الطور $\Phi_1-\Phi_2$ بين الإشارتين الواصلتين الى نقطـة معطاة . ( إن الامر يتعلق طبعاً بفرق الطور فقط لا بالطور نفسه ) وعلى هذا لننظر في الحالة التي تكون فيها الهزازتان المتساويتان سعة ، مفصولتين بمسافة d ولهما طور نسبي ذاتي يساوي $\alpha$ ، (أي عندما يكون طور إحداهما صفراً يكون طور الأخرى مساوياً $\alpha$ ) . وسؤالنـا الآن هو كم تبلغ الشدة في منحى سمتي يصنع زاوية $\theta$ مع خط الشرق والغرب . [ لاحظ أن هذه الزاوية ليست الزاوية $\theta$ نفسها الظاهرة في الشكل (٢٩ــ١ ) . ونحن في حيرة من أمرنا بين استعمال رمز غير اصطلاحي مثل $\theta$ أو استعمال الرمز المصطلح عليه $\theta$ المستخدم في الشكل (٢٩ ــ ١٠ ) . ويتم إيجاد علاقة الطور بملاحظة أن الفرق في المسافة من P




الشكل (٢٩ - ١٠)

هزازتان سعتاهما متساويتان ، وفرق الطور بينهما $\alpha$

إلى الهزازتين يساوي $d \sin\theta$ ، بحيث أن فرق الطور المقابل لذلك يساوي عدد الأطوال الموجية الموجود في $d\sin\theta$ مضروباً بـ $2\pi$ . ( ولربما يرغب من هم أكثر تزمتاً أن يُضرب بالمقدار $d\sin\theta$ ، العددُ الموجي k وهو معدّل تغير الطور مع المسافة ؛ ولكن الأمر واحد على وجه الضبط ) . وعلى هذا فإن فرق الطور العائد إلى الفرق في المسافة يساوي $2\pi d\sin\theta/\lambda$ ، ولكن بسبب عدم

تواقت الهزازتين ، هناك فرق طور إضافي $\alpha$ . إذن فرق الطور بين الاهتزازتين لدى وصولها معاً يساوي :

$$\Phi_2 - \Phi_1 = \alpha + 2\,\pi\, d \sin\,\theta/\lambda \qquad (29-17)$$

وهذه العلاقة تأخذ كل الحالات بعين الاعتبار . وعلى هذا فإن كل ما علينا عمله هو وضع هذه العبارة في ( 16—29 ) من أجل حالة $A_1 = A_2$ ، فنستطيع حساب كل النتائج المختلفة من أجل هوائيين ذوي شدتين متساويتين .

لنر الآن ماذا يحدث في حالاتنا المختلفة . إن سبب معرفتنا أن الشدة في المنحى 30° درجة في الشكل( ٢٩ - ٥ )مثلاً ، تساوي 2 هو كما يلي : إن المسافة الفاصلة بين الهزازتين تساوي $\lambda/2$ ، إذن ففي المنحى 30° يكون لدينا :

$$d \sin\theta = \frac{\lambda}{4} \quad \text{،} \quad \text{وعليه فإن :} \quad \Phi_2 - \Phi_1 = 2\pi\lambda/4\lambda = \frac{\pi}{2}$$

فحد التداخل يساوي الصفر إذن . ( في هذه الحالة نجمع متجهتين متعامدتين ) . والسعة الناتجة هي الوتر في مثلث قائم الزاوية متساوي الساقين ، أي تساوي $\sqrt{2}$ مرة وحدة السعة ؛ وبتربيعها نحصل على شدة تساوي ضعف شدة إحدى الهزازتين . ويمكن الحصول على نتائج كل الحالات الأخرى باتباع هذه الطريقة نفسها .

* * *

## مسائل وتمارين

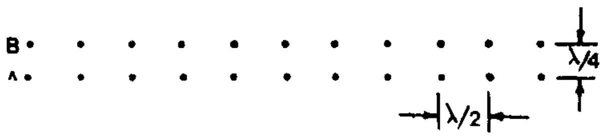
٢٩–١ : لدينا هوائيان ، موصولان كما هو مبين في الشكل [ ٢٩–٥ ( أ ) ] ، ومتفقان في الطور . يسيّر الهوائيان بحيث يشع أحدهما ، إذا كان لوحده ، شدة معينة $I_0$ في كل الاتجاهات الأفقية ، ويشع الآخر ، شدة $2I_0$ . ماذا ينبغي أن تكون الشدات الملاحظة في الاتجاهات المختلفة المبينة في الشكل ؟

٢٩-٢ : لدينا أربع وحدات متماثلة من المشعّات ذوات القطبين ، تصَفّ على خط واحد ، بحيث توازي كل واحدة منها الاخرى، وتبعد عنها مسافة تبلغ 2.50 cm . تسيّر المشعات كلها بتواتر واحد قدره $3.00\times10^{9}\ \mathrm{sec}^{-1}$ ، ويجعل طورها بحيث أننا إذا بدأنا من أحد الطرفين فكل ذي قطبين لاحق يتأخر عن ذي القطبين السابق بمقدار $90°$ . أوجد شدة نمط الاشعاع عند مسافة بعيدة جداً في المستوي الاستوائي ( أي العمودي على محاور ذوات القطبين ) ، وارسم هذا التابع في الاحداثيات القطبية . يدعى مثل هذا المخطط نمط الاشعاع لجملة الهوائي .

٢٩–٣ : تتألف النظارة الفلكية الراديوية لمعهد ( كالتك ) من صحنين ، شكل كل منهما مجسم قطع مكافىء . ويقع هذان الصحنان في وادي ( اونز ) ويبعد أحدهما عن الآخر 1600 قدماً . ويجمع كل صحن الاشعاع الوارد على مستقبل صغير واقع في محرق مجسم القطع المكافىء . ثم تغذي الاشارتان « مازجاً » وحيداً يقع في منتصف المسافة بين

الصحنين . تجمّع المازج الاشارتين معاً ويستخرج وسطي مربع قيمة المحصلة . بأية دقة ينبغي أن يكون الموضع الزاوي ، لمنبع نقطي بعيد، قابلاً للتعيين بواسطة هذه الجملة ، إذا افترضنا أن ترجّحاً، مقداره عشرة بالمائة في إشارة المخرج ، هو ترجح ذو شأن . افرض طولاً موجياً يساوي 50 cm .

٢٩–٤ : تنتقل شحنة q على مسار دائري نصف قطره a بسرعة زاوية ω . استخرج الحقل الكهربائي ، عند مسافة R تبعد عن الشحنة بعداً كبيراً ، وتصنع زاوية θ مع محور المسار الدائري . أوجـد شدة الاشعاع في مستوي الدائرة ، وعند نقطة واقعة على محور الدائرة وبعيدة عنها بعداً كبيراً R .



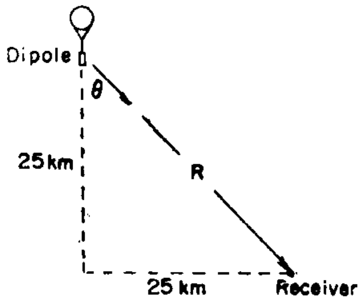

الشكل ( ٢٩ – ١١ )

٢٩–٥ : لدينا خط مزدوج مؤلف من عدد N من ذوات قطبين مهتزة ومتساوية البعد فيما بينها ، وتقع كما هو مبين في الشكل ( ٢٩ – ١١ ) . تُسيّر كل ذوات القطبين الموجودة في السطر A بطور واحد ، كما تسيّر كل التي في السطر B بطور يتأخر 90° عن تلك التي في السطر A . ارسم نمط الاشعاع في المستوي الاستوائي ، كما في التمرين ( ٢٩ – ٢ ) ، وذلك عند مسافة بعيدة جـداً عن مجموعة المشعات .

٢٩–٦ : تهتز الالكترونات الكائنة في سلك رفيع مستقيم طويل ، طوله L ، اهتزازاً واقعاً في اتجاه السلك ، وذا تواتر زاوي ω ، وسعة صغيرة a ،

وطور واحد . أوجد الحقل الكهربائي عند مسافة بعيدة جداً R حيث ($R \gg L$) ، وفي منحى يميل بزاوية θ على محور السلك .

٢٩–٧ : تتناسب الاستطاعة ، في وحدة المساحة ، التي تقدمها موجة كهرطيسية مع وسطي مربع شدة الحقل الكهربائي . أوجد جزء الطاقة الكلية ، الذي تشعه شحنة مهتزة ، والذي يسقط على وحدة مساحة ، إذا كانت وحدة المساحة هذه عمودية على شعاع نصف القطر R ، وكانت تصنع زاوية θ مع محور الاهتزاز . استخرج هذه الاستطاعة ، مقدرة بـ $wm^{-2}$ ، من أجل ذي قطبين موجّه شاقولياً ، ومعلّق من منطاد صغير حامل لأجهزة بث ، ومستخدم في تجارب الأشعة الكونية ، بفرض أن ذا القطبين موجود على ارتفاع 25 km ، وعلى بعد أفقي قدره 25 km من جهاز الاستقبال ، وان المرسل يشع طاقة كلية تساوي 0.5 واط ، انظر الى الشكل (٢٩ – ١٢).




الشكل (٢٩ – ١٢)

* * *

# الفصل الثلاثون

Diffraction

# الانعراج

## ٣٠ ـــ ١ : السعة الحاصلة العائدة الى n هزازة متماثلة

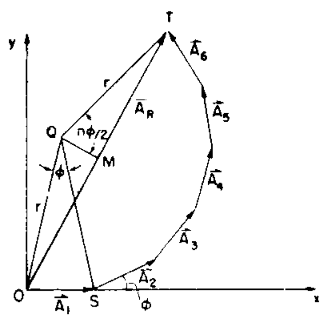
The resultant amplitude due to n equal oscillators

إن هـذا الفصل استمرار مباشر للفصل السابق بالرغم من تغيير الاسم من التداخل إلى الانعراج . ولم يستطع أحد أبداً أن يبين الفرق بـــين التداخل والانعراج على نحو مرضٍ . والمسألة مجرد عرف ، فليس هناك بينهما أي اختلاف فيزيائي محدد وهام . وخير ما نستطيع عمله ، إذا صح القول ،هو أن نقول انه عندما تكون هناك بضعة منابع متداخلة ، اثنان مثلاً ، فالنتيجة حينئذ تسمى عادة تداخلاً ، أما إذا كان هناك عدد كبير من المنابـع ، فإنه يبدو ان كلمة الانعراج هي الأكثر استعمالاً في الغالب . وهكذا ، لن نهتم بعد الآن فيما اذا كان الامر تداخلاً أو انعراجاً ، بل نمضي مباشرة من حيث توقفنا في منتصف الموضوع في الفصل الأخير .

لنناقش إذن الحالة التي تكون فيها n هزازة على أبعاد متساوية من بعضهـا البعض ، وكلها ذوات سعة واحدة ولكن يفترق بعضها عن بعض بالطور ، إما بسبب أنها تُشغَّل بأطوار مختلفة أو بسبب أننا ننظر إليها من زاوية بحيث يكون هناك فرق في التأخر الزمني . ولهذا السبب أو ذاك ، علينا ان نجمع شيئاً كالتالي :

$$R = A\ [\cos \omega t + \cos (\omega t + \varnothing) + \cos (\omega t + 2\varnothing) + \dots \qquad (30-1)$$
$$\dots + \cos (\omega t + (n-1)\varnothing)]$$

حيث $\varnothing$ هو فرق الطور بين هزازتين متجاورتين ، عندما يُنظر إليهما في منحى معين، وهو على وجه الضبط $\varnothing = \alpha + 2\pi d \sin \theta/\lambda$ . وعلينا الآن أن نجمع كل هذه الحدود معاً ، وسنقوم بذلك بطريقة هندسية . أما الحد الأول فطوله A وطوره صفر ، وأما الحد التالي فطوله A أيضاً وطوره $\varnothing$ . والحد الذي يليه ذو طول A أيضاً وطوره يساوي $2\varnothing$ ، وهكذا دواليك. وعلى هذا فإنناوضوحاً نَجْري وفق مضلع متساوي الزوايا ذي n ضلعاً كالمبين في الشكل ( ٣٠-١ ) .




الشكل (٣٠-١)

السعة الحاصلة لستّ منابع ( $n = 6$ ) تفصل بين كل منبعين متجاورين مسافة واحدة وفرق طور واحد $\varnothing$

وتقع رؤوس المضلع كلها طبعاً على دائرة . ويمكننا إيجـاد السعة الحاصلة بسهولة فائقة بأن نجد نصف قطر تلك الدائرة . نفترض أن Q هو مركز الدائرة . نعرف حينئذ أن الزاوية OQS تساوي تماماً زاوية الطور $\varnothing$ . ( وذلك لأن العلاقة الهندسية بين نصف القطر QS والمتجهة $A_2$ كالعلاقة بين نصف القطر OQ والمتجهة $A_1$ ، لذلك فهما يصنعان فيما بينهما زاوية تساوي $\varnothing$ ) .

وعليه فإن نصف القطر r ينبغي أن يكون بحيث أن $A = 2\,r \sin \frac{\varnothing}{2}$ ، وهذا ما يحدد قيمة r . ولكن الزاوية الكبيرة OQT تساوي $n\varnothing$ ، إذن نجد أن $A_R = 2\,r \sin \frac{n\,\varnothing}{2}$ . فإذا دمجنا هاتين النتيجتين للتخلص من r ، نحصل على ما يلي :

$$A_R = A\,\frac{\sin n\varnothing/2}{\sin \varnothing/2} \qquad (30\text{–}2)$$

وبذلك تكون الشدة الحاصلة :

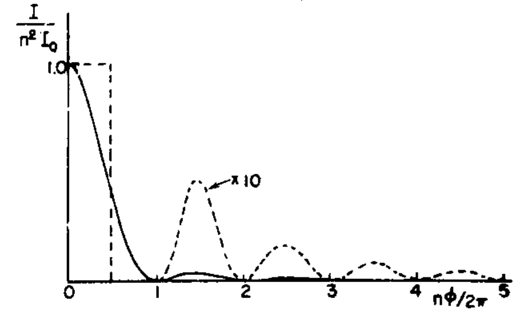
$$I = I_0 \frac{\sin^2 \frac{n\varnothing}{2}}{\sin^2 \frac{\varnothing}{2}} \qquad (30-3)$$

لنحلل الآن هذهالعبارة ولندرس بعض نتائجها . ففي المقام الأول ، يمكننا اختبارها فيحالة $n = 1$ . إنها تعطيحينئذ $I = I_0$ . ثم نختبرها في حالة $n = 2$ : فإذا كتبنا $\sin \varnothing = 2 \sin \frac{\varnothing}{2} \cos \frac{\varnothing}{2}$ ، وجدنا أن $A_R = 2A \cos \frac{\varnothing}{2}$ وهذه العلاقة تتفق مع المعادلة (12–29) .

إن ما دعانا إلى التفكير في استعمال عدد من المنابع هو أننا قد نحصل على شدة في اتجاه ما أكبر بكثير منها في اتجاه آخر ؛ أي أن تنخفض كثيراً شدة النهاية العظمى المجاورة التي يكون لها وجود فيما لو كان هناك منبعان فقط . ولكي نرى هذا الأثر ، نرسم المنحني العائد للعلاقة (3 — 30 ) ، بأخذ n عدداً كبيراً جداً وبرسم الجزء القريب من $\varnothing = 0$ . فأولاً ، إذا كان $\varnothing$ يساوي الصفر تماماً ، كان لدينا $\frac{\text{صفر}}{\text{صفر}}$ ، ولكن إذا كان $\varnothing$ صغيراً صغراً غير متناه ، فإن النسبة بين مربعيْ الجيبين تساوي $n^2$ لأن الزاوية وجيبها يكونان حينئذ متساويين تقريباً . فشدة النهاية العظمى للمنحني تساوي إذن $n^2$ مرة شدة هزازة

واحدة . ومن السهل إدراك ذلك ، لأنه إذا كانت كل الأمواج متفقة في الطور ، فإنه لا يكون بين المتجهات الصغيرة أي زاوية نسبية ، وكل المتجهات n يضاف بعضها إلى بعض بحيث تكون السعة الحاصلة n مرة أكبر وتكون الشدة $n^2$ مرة أكبر .

وكلما ازداد فرق الطور ∅ ، بدأت النسبة بين الجيبين بالنقصان ، وتنعدم أول مرة عندما $\pi = n\frac{\varnothing}{2}$ ، لأن $\sin \pi = 0$ . وبعبارة أخرى ، إن النهاية الصغرى الأولى في المنحني الظاهر في الشكل (٣٠-٢) تقابل $\varnothing = \frac{2\pi}{n}$ . وبدلالة




الشكل (٣٠-٢)
الشدة كتابع لزاوية الطور من أجل عدد كبير
من الهزازات ذوات الشدة الواحدة

ما يحصل للأسهم في الشكل( ٣٠ - ١) ، تحدث النهاية الصغرى الأولى عندما تعود الأسهم جميعاً إلى نقطة البداية ؛ وهذا يعني أن الزاوية الكلية لكل الأسهم ، أي فرق الطور الكلي بين الهزازة الأولى والهزازة الأخيرة ينبغي أن يساوي $2\pi$ لإكمال الدائرة .

ونمضي الآن إلى النهاية العظمى التالية ، ونود أن نرى أنها فعلاً أصغر بكثير

من الأولى ، مثلما كنا نأمل . ولن نمضي إلى الموضع الدقيق للنهاية العظمى لأن الصورة والمخرج في المعادلة (3 - 30) كلتيهما متغيران، ولكن $\sin \frac{\varnothing}{2}$ يتغير تغيراً بطيئاً جداً إذا ما قورن بتغير $\sin \frac{n\varnothing}{2}$ عندما يكون n كبيراً ، لذلك عندما يكون $\sin \frac{n\varnothing}{2} = 1$ ، نكون على قرب شديد من النهاية العظمى. فالنهاية العظمى التالية للمقدار $\sin^2 \frac{n\varnothing}{2}$ تحصل عندما $\frac{n\varnothing}{2} = \frac{3\pi}{2}$ ، أو $\varnothing = \frac{3\pi}{n}$ . وهذا يقابل دوران الأسهم دورة ونصف دورة. وبوضع $\varnothing = \frac{3\pi}{n}$ في الصيغة (3—30) لايجاد مقدار النهاية العظمى ، نجد أن $\sin^2 \frac{3\pi}{2} = 1$ في الصورة (ولهذا السبب اخترنا هذه الزاوية ) ، ونجد أن لدينا في المخرج $\sin^2 \frac{3\pi}{2n}$ . فإذا كان n عدداً كبيراً كبراً كافياً ، فإن هذه الزاوية تكون صغيرة جداً ، ويكون جيبها مساوياً الزاوية نفسها مقدرة بالراديان ؛ لذلك فمن أجل كل الأغراض العملية ، يمكننا أن نضع $\sin \frac{3\pi}{2n} = \frac{3\pi}{2n}$ . وعلى هذا نجد أن الشدة عند هذه النهاية العظمى هي : $I = I_0 \frac{4n^2}{9\pi^2}$ . ولكن $n^2 I_0$ كانت الشدة العظمى ، وهكذا نحصل على $4/9\pi^2$ من شدة النهاية العظمى ، أي نحو 0.047 أو أقل قليلاً من خمسة في المائة من شدة النهاية العظمى ! ولا ريب أن هناك شدات متناقصة فيما بعد ذلك . وهكذا فإن لدينا نهاية عظمى مركزية شديدة وضيقة تحيط بها من جانبيها نهايات عظمى ثانوية ضعيفة جداً .

ويمكن البرهان على أن مساحة المنحني كله بما في ذلك كل النتوءات الصغيرة ، تساوي $2\pi n I_0$ ، أي ضعف مساحة المستطيل المنقط في الشكل (٣٠ – ٢) .

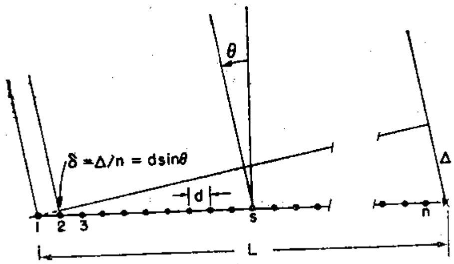
لننظر الآن علاوة على ذلك كيف يمكننا تطبيق المعادلة ( 3 - 30 ) في ظروف مختلفة ولنحاول أن نفهم ما هو جار . لنفترض أن كل المنابع واقعة

في خط واحد كما هو مرسوم في الشكل ( ٣٠ - ٣ ) . هناك n منبعاً تفصل بين كل اثنين متجاورين مسافة d ، ونفترض أن فرق الطور الخاص بكل اثنين متجاورين يساوي $\alpha$ . وعليه فإننا إذا كنا ننظر في منحى معطى يصنع مع الناظم على خط المنابع زاوية $\theta$ ، فإنه يكون هناك فرق طور إضافي يساوي $2\pi d \sin\theta / \lambda$ بسبب التأخر الزمني الذي تحدثنا عنه من قبل بين كل موجتين متعاقبتين ، وعليه فإن :

$$\varnothing = \alpha + 2\pi d \sin\theta/\lambda$$

$$\varnothing = \alpha + kd \sin\theta \qquad (30-4)$$

لننظر أولاً في الحالة $\alpha = 0$ . أي عندما تكون كل الهزازات متفقة في الطور ، ونود أن نعرف ما تكون عليه الشدة كتابع للزاوية $\theta$ . ولإيجاد




الشكل (٣٠ - ٣)

صف من الهزازات المتساوية الشدة عددها n تقع على خط واحد وتعمل بطور يتبع العلاقة : $\alpha_s = s\alpha$

ذلك ، ليس علينا إلا أن نضع $\varnothing = kd \sin\theta$ في الصيغة (3 - 30) ونرى ماذا يجري . هناك أولاً نهاية عظمى عندما $\varnothing = 0$ . وهذا يعني أنه عندما تكون كل الهزازات متفقة في الطور ، فإن هناك شدة كبيرة في المنحى $\theta = 0$ . ومن جهة أخرى ، هناك سؤال هام هو : أين تحدث النهاية الصغرى الأولى ؟ إنهـــا تحدث عندما $\varnothing = \frac{2\pi}{n}$ . وبعبارة أخرى ، نحصل على النهاية الصغرى

الأولى للمنحني عندما $2\pi d \sin \theta / \lambda = \frac{2\pi}{n}$ . وإذا تخلصنا من $2\pi$ في الطرفين، يمكننا أن نرى العلاقة بشكل أفضل ، إذ تصبح كما يلي :

$$nd \sin \theta = \lambda \qquad (30-5)$$

لنتفهم الآن فيزيائياً لماذا نحصل على نهاية صغرى في ذلك الوضع . إن nd يساوي الطول الكلي L لصف الهزازات . ونجد بالاستناد على الشكل (٣٠-٣) ، أن $nd \sin \theta = L \sin \theta = \Delta$ . إن ما تنبىء به العلاقة (30-5) هو أنه عندما يصبح Δ مساوياً طول موجة واحدة ، نحصل على نهاية صغرى . والآن لماذا نحصل على نهاية صغرى عندما $\Delta = \lambda$ ؟ ذلك لأن إسهامات الهزازات المختلفة في الطور تكون حينئذ موزعة توزيعاً منتظماً من $0°$ إلى $360°$ . فالأسهم في الشكل (٣٠ - ١) تدور دورة كاملة ، أي أننا نقوم بجمع متجهات متساوية لها كل المناحي ، ومثل هذا المجموع يساوي الصفر . وعلى هذا عندما تكون لدينا زاوية بحيث أن $\Delta = \lambda$ ، نحصل على نهاية صغرى ، وهذه هي النهاية الصغرى الأولى .

وهناك ميزة أخرى هامة للصيغة (30—3) ، وهي أنه اذا ازدادت الزاوية ∅ بضاعفات $2\pi$ ، فإن هذا لا يغير شيئاً من الصيغة . وعلى هذا نحصل على نهايات عظمى شديدة أخرى عندما تكون ∅ مساوية $2\pi$ ، $4\pi$ ، $6\pi$ وهكذا دواليك. وفي جوار كل من هذه النهايات العظمى يتكرر النمط المبين في الشكل (٣٠ - ٢). ويمكن أن نسأل أنفسنا ، ماهو الشرط الهندسي الذي يؤدي الى هذه النهايات العظمى الشديدة الأخرى ؟ إن الشرط هو ان يكون $\varnothing = 2\pi m$ ، حيث m أي عدد صحيح ، أي : $2\pi d \sin \theta / \lambda = 2\pi m$ . وبالتقسيم على $2\pi$ نجد أن :

$$d \sin \theta = m \lambda \qquad (30-6)$$

وتبدو هـذه الصيغة مشابهـة للصيغة الأخرى ( 5—30 ) . ولكن ليس هذا صحيحاً ، فتلك الصيغة كانت $n d \sin \theta = \lambda$ ، والفرق هو أن علينا هنا أن ننظر في المنابع كلًا على حدة ، وعندما نقول $d \sin \theta = m \lambda$ ، فهذا يعني أن لدينا زاوية $\theta$ تجعل $\delta = m \lambda$ . وبعبارة أخرى ، فكل منبع يسهم الآن بمقدار معين ، وتكون فروق الطور بين المنابع المتعاقبة مساوية مضاعفات $360^\circ$ ، فهي إذن تسهم وهي متفقة في الطور ، لان الاختلاف في الطور بمقدار $360^\circ$ كالاتفاق في الطور تماماً . وهكذا فإن المنابع كلها تسهم متفقة في الطور وتولد نهاية عظمى مماثلة في جودتهـا تماماً للنهاية العظمى عندما $m = o$ ، وهي التي ناقشناها من قبل . فالنتوءات الثانوية والشكل الكلي لنمط توزع الشدة يماثل تماماً الشكل في جوار $\delta = 0$ ، مع النهايات الصغرى نفسها تماماً على كل من الجانبين ، الخ . وهكذا فإن مثل هذا الترتيب يصدر حزماً في اتجاهات مختلفة ، ولكل منها نهاية عظمى شديدة مركزية وعدد معين من « الفصوص الجانبية » الضعيفة . ويشار إلى الحزم الشديدة المختلفة بأنها الحزمة ذات الرتبة صفر والحزمة ذات الرتبة الاولى ، الخ ، وذلك وفقاً لقيمة m . ويطلق على m اسم رتبة الحزمة .

ونلفت النظر إلى أنه إذا كانت المسافة d أقل من $\lambda$ ، فإنه يمكن ألا يكون للمعادلة ( 6 — 30 ) أي حل باستثناء $m = 0$ ، بحيث إذا كانت المسافة الفاصلة صغيرة صغراً مفرطاً ، كانت هناك حزمة واحدة ممكنة ، وهي الحزمة ذات الرتبة صفر التي يقع مركزها حيث $\theta = 0$ . ( وهناك أيضاً بالطبع حزمة في الاتجاه المعاكس ) . إذن لكي نحصل على نهايات عظمى شديدة ثانوية ، ينبغي أن نجعل المسافة الفاصلة d في الترتيب أكبر من طول موجي واحد .

## ٣٠ ـ ٢ : شبكة الانعراج

The diffraction grating

من الممكن في الأعمال التقنية الخاصة بالهوائيات والأسلاك أن نرتب الأمر بحيث تكون كل أطوار المزازات الصغيرة أو الهوائيات متساوية . والمسألة هي إذا كان بإمكاننا ان نفعل مثل ذلك في الضوء وكيف يمكن ذلك . إننا لا نستطيع في الوقت الحاضر أن ننشيء محطات راديو صغيرة ذات تواتر ضوئي وأن نربطها معاً بأسلاك غير متناهية في الصغر وأن نشغلها كلها بطور واحد معطى . ولكن هناك طريقة سهلة جداً للقيام بما يكافىء ذلك .

لنفترض أن لدينا عدداً من الأسلاك المتوازية، تفصل بين كل اثنين متجاورين منها مسافة d ، وأن لدينا منبعاً لتواترات راديوية يقع على بعدٍ كبير جداً ، في اللانهاية عملياً ، وأن هذا المنبع يولد حقلاً كهربائياً يصل إلى كل سلك من الأسلاك بالطور نفسه ( إذ أن المنبع على بعدٍ كبير بحيث ان التأخر الزمني واحد بالنسبة إلى كل الأسلاك ).( ويمكننا أن ندرس حالات تكون فيها صفوف الهزازات منحنية، ولكن دعنا نأخذ صفاً مستوياً). وعندما يصل الحقل الكهربائي الخارجي الصادر عن المنبع الأصلي الى الأسلاك ، فإنه يجعل الالكترونات تهتز في كل سلك منها ، وتمثل هذه الالكترونات في حركتها مولدات جديدة . وتسمى هذه الظاهرة بالتبعثر . ويمكن لموجة ضوئية صادرة من منبع ما أن تثير حركة الالكترونات في جزء من مادة ما ، فتولد هذه الحركات أمواجها الخاصة . إذن فكل ما يلزم هو إقامة عدد من الاسلاك المتساوية الابعاد عن بعضها البعض وتشغيلها بواسطة منبع ذي تواتر راديوي واقع على بعدٍ كبير ، ونحصل بذلك على الحالة التي نبغيها ، دون الحاجة الى عدد كبير من الاسلاك المرتبة ترتيباً خاصاً . وعندما يكون الورود ناظمياً ، تكون الاطوار كلها متساوية ، ونحصل على الشرط الذي كنا نناقشه بالضبط . وعليه ، فإنه إذا كانت المسافة الفاصلة بين

الأسلاك أكبر من الطول الموجي ، فاننا نحصل على شدة كبيرة للتبعثر في الاتجاه الناظمي ، وكذلك في اتجاهات أخرى معينة تعطيها العلاقة (6– 30) .

إن هذا الأمر يمكن فعله أيضاً باستعمال الضوء ! فعوضاً عن الأسلاك ، نستعمل قطعة مستوية من الزجاج ونُحدث فيها حزوزاً بحيث أن كلًا من هذه الحزوز يبعثر الضوء بعثرة مختلفة بعض الشيء عن بعثرة باقي الزجاج له . فإذا أضأنا قطعة الزجاج المحزوزة فإن كل حز فيها يمثل منبعاً ، وإذا رتبنا الحزوز ترتيباً دقيقاً ، ولكن دون أن تقل المسافة الفاصلة بينهما عن طول موجي (وعلى كل فإنه يكاد يكون من المستحيل تقنياً جعل المسافة أقل من طول موجي) ، فإننا نتوقع حدوث ظاهرة تشبه المعجزة : فالضوء لن يمر من خلال الزجاج في استقامة وروده فحسب ، بل تكون هناك أيضاً حزمة شديدة في منحى يصنع زاوية معينة تتوقف قيمتها على المسافة الفاصلة بين الحزوز ! وقد صنعت مثل هذه الأشياء فعلًا وانتشر استعمالها ، وهي تسمى شبكات الانعراج .

وتتكون شبكة الانعراج في أحد أشكالها من مجرد صفيحة زجاجية مستوية شفافة وعديمة اللون وعليها حزوز . وهي في الغالب بضع مئات من الحزوز في المليمتر الواحد ، رتبت بعناية فائقة كي تكون متساوية الأبعاد عن بعضها البعض . ويمكن إدراك أثر مثل هذه الشبكة بتهيئة منبع ضوئي شديد بحيث يتكون على حاجز ما خط ضوئي شاقولي ضيق ( هو خيال شق ضيق ) . فعندما نضع الشبكة في طريق الحزمة ونجعل حزوزها رأسية ، فإننا نرى أن الخط الضوئي يظل في موضعه ولكن تُرى بالإضافه إليه وعلى كل من جانبيه بقعة أخرى من الضوء الشديد الذي يكون ملوناً . وهذه بالطبع هي خيال الشق ممتداً على مجال زاوي عريض لأن الزاوية $\theta$ في المعادلة ( 6– 30 ) تتوقف على $\lambda$ ، ولأن الأضواء المختلفة الألوان تقابل ، كما نعلم ، تواترات مختلفة وبالتالي أطوالاً موجية مختلفة . وأكبر الأطوال الموجية في الضوء المرئي ،

يوافق الأحمر ، ولما كان $d \sin \theta = \lambda$ ، فالضوء الأحمر يتطلب زاوية $\theta$ أكبر . وإننا نجد بالفعل أن الأحمر يقع على اكبر بعد زاوي عن الخيال المركزي ! وينبغي أن تكون هناك حزمة في الجانب الآخر ، وهي حزمة نراها فعلاً على الحاجز . ويمكن كذلك أن يكون هناك حل آخر للمعادلة (6 — 30) عندما $m = 2$ . ونحن نرى بالفعل أن هناك شيئاً غير واضح وضعيفاً جداً ، بل إن هناك حزماً أخرى فيما وراء ذلك .

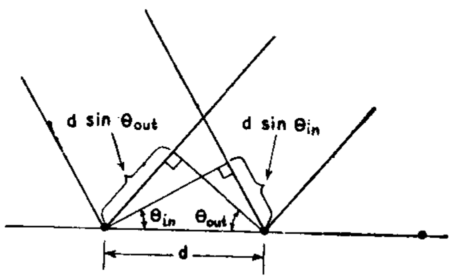
لقد تبين لنا منذ قليل أنه ينبغي أن تكون لكل هذه الحزم شدة واحدة، ولكننا نرى الآن أنها ليست كذلك بالفعل ، حتى ان الحزم الاولى على اليمين وعلى اليسار لا تكون متساوية حقاً ! والسبب هو أن الشبكة صنعت بعناية لكي تُحدث ذلك تماماً. فكيف يتم الأمر ؟ إذا كانت الشبكة تتألف من حزوز دقيقة جداً ، عرضها غير متناه في الصغر والمسافات بينها متساوية ، فإن كل الشدات تكون متساوية فعلاً . ولكن ، بالرغم من أننا نظرنا في أبسط الحالات، فإنه يمكننا في الواقع ان ننظر ايضاً في ترتيب لأزواج من الهوائيات ، تكون فيه لكل فرد من الزوجين شدة معينة وطور نسبي ما . ففي هذه الحالة ، يمكن الحصول على شدات متفاوتة في الرتب المختلفة . وفي الغالب ، تصنع الشبكة بحيث تكون الحزوز فيها « كأسنان المنشار » بدلاً من أن تكون حزوزاً متناظرة . واذا رتبت « أسنان المنشار » بعناية ، فإنه يمكن تجميع الضوء في رتبة خاصة من الطيف أكثر من تجميعه في الرتب الاخرى . ان ما نرغب في الحصول عليه من شبكة عملية هو تجميع اكبر كمية ممكنة من الضوء في احدى رتب الطيف . وقد يبدو هذا امراً معقداً لاخير فيه ، ولكن في صنعه براعة فائقة حقاً ، لأنه يجعل الشبكة أكثر فائدة .

لقد نظرنا حتى الآن في الحالة التي تكون فيها كل أطوار المنابع متساوية . ولكننا حصلنا ايضاً على صيغة لفرق الطور $\varnothing$ عندما يختلف الطور من منبع الى

الذي يليه بزاوية $\alpha$ . وهذا يستدعي وصل هوائياتنا بأسلاك بحيث يكون هناك انزياح طفيف في الطور من واحد لآخر . فهل نستطيع ان نقوم بذلك في حالة الضوء ؟ نعم ، نستطيع أن نقوم بذلك بسهولة فائقة ، إذا افترض أن هناك منبعاً ضوئيـــاً في اللانهاية ، يرسل الضوء في زاوية بحيث أنه يسقط على الشبكة بزاوية ورود $\theta_1$ ، ولنقل إننا نود دراسة الحزمة المتبعثرة التي تبرز بزاوية الانعراج $\theta_2$ . إن هـذه الزاوية $\theta_2$ هي الزاوية $\theta$ نفسها التي كانت لدينا من قبل ، أما الزاوية $\theta_1$ فهي مجرد وسيلة لجعل الطور مختلفاً من منبع لآخر : فالضوء الوارد من المنبع الأصلي البعيد الأول يصدم أحد الحزوز ثم يصدم التالي فالذي يليه وهلمجرا ، مـع انزياح في الطور من حز لآخر يساوي ، كما نرى : $\alpha = -d \sin \theta_1 / \lambda$ . وبذلك نحصل على صيغة للشبكة عندما يرد عليها الضوء بزاوية ما ويرتد عنها بزاوية أخرى وهذه الصيغة هي :

$$\varnothing = 2 \pi d \sin \theta_2 / \lambda - 2 \pi d \sin \theta_1 / \lambda \qquad (30-7)$$

لنسع الى إيجاد المواضع التي نحصل فيها على شدة كبيرة في ظل هـــذه الظروف . إن شرط الشدات الكبيرة هو بالطبع أنه ينبغي أن تكون الزاوية $\varnothing$ أحد مضاعفات $2\pi$ . وهناك عدة نقاط هامة تنبغي الإشارة اليها .




الشكل (٣٠ - ٤)

فرق المسير ، في حالة شعاعين مبعثرين عند حزّين متجاورين في شبكة ، يساوي $d \sin \theta_2 - d \sin \theta_1$

حيث $\theta_1 = \theta_{in}$ و $\theta_2 = \theta_{out}$

هناك حالة ذات شأن كبير هي الحالة التي تقابل $m = o$ ، حين تكون المسافة $d$ أصغر من $\lambda$ ؛ وفي الحقيقة هذا هو الحل الوحيد . ففي هذه الحالة ، نرى أن $\sin \theta_2 = \sin \theta_1$ ، وهذا يعني أن الضوء يرتد في المنحى نفسه الذي كان الضوء يرد وفقه على الشبكة . وقد يتبادر الى ذهننا أن الضوء « يخترق » الشبكة اختراقاً . ولكن ليس هذا صحيحاً ، فإن ما نتحدث عنه هو ضوء مختلف . فالضوء الذي يخترق الشبكة يَرِد من المنبع الأصلي ؛ أما الضوء الذي نتحدث عنه فهو الضوء الجديد الذي يتولد بالتبعثر . ويتبين أن الضوء المبعثر يسلك المنحى نفسه الذي يسلكه الضوء الأصلي، بل إنه يمكنه أن يتداخل معه ، وهي ظاهرة سوف ندرسها فيما بعد .

وهناك حل آخر لهذه الحالة نفسها . فمن أجل قيمة $\theta_1$ معطاة ، يمكن أن تكون $\theta_2$ مكملة للزاوية $\theta_1$. وهكذا فنحن لانحصل فقط على حزمة لها منحى الحزمة الواردة نفسه بل نحصل أيضاً على حزمة في منحى آخر هو ، إذا دققنا النظر ، المنحى الذي تكون من أجله زاوية الورود مساوية زاوية التبعثر . ونسمي هذه الحزمة الحزمة المنعكسة .

وهكذا نبدأ في فهم الآلية الأساسية للانعكاس : فالضوء الساقط يولد حركات الذرات في العاكس ، ثم يولد العاكس موجة جديدة ، وأحد الحلول التي تعطي منحى التبعثر ، وهو الحل الوحيد عندما تكون المسافة الفاصلة بين المبعثرات صغيرة بالنسبة لطول الموجة ، هو الحل الذي يقضي أن الزاوية التي ينعكس بها الضوء تساوي الزاوية التي يرد بها !

لندرس بعد هذا الحالة الخاصة عندما $d \longrightarrow 0$ . أي أن لدينا قطعة صلبة من المادة ، إذا صح القول ، ولكن ذات طول محدود . ونود بالإضافة إلى ذلك أن يكون تغير الطور من مبعثر إلى الذي يليه متناهياً نحو الصفر . وبعبارة

أخرى ، نضع عدداً أكبر فأكبر من الهوائيات بين الهوائيات الأخرى ، بحيث تصبح فروق الطور أصغر فأصغر ، ولكن يكون ازدياد عدد الهوائيات بطريقة تُبقي على ثبات فرق الطور الكلي بين أحد طرفي صف الهوائيات وطرفه الآخر. لنر ماذا يطرأ على المعادلة (3 – 30) إذا حافظنا على فرق الطور $n\phi$ بين الطرفين ثابتاً ( $\Phi = n\phi$ مثلاً ) ، وجعلنا عدد الهوائيات يقترب من اللانهاية ، وجعلنا تغير الطور $\phi$ بين كل هوائي والذي يليه يقترب من الصفر . ولكن $\phi$ يصبح الآن من الصغر بحيث أن $\sin\phi = \phi$ ، وإذا أدركنا أيضاً أن $n^2 I_0$ هي $I_m$ أي الشدة العظمى في مركز الحزمة فإننا نجد :

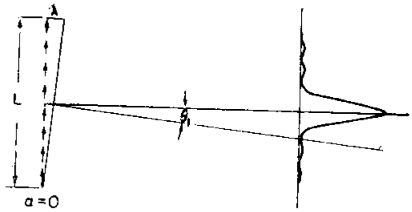
$$I = 4\, I_m \sin^2 \frac{1}{2}\Phi / \Phi^2 \qquad (30-8)$$

إن هذه الحالة الحدية هي الحالة المبينة في الشكل (٣٠ – ٢) .

ففي مثل هذه الظروف نجد صورة من النوع العام نفسه الذي نجده في حالة مسافة فاصلة منتهية عندما $d < \lambda$ ؛ فالفصوص الجانبية كلها تكون عملياً كالسابقة تماماً ، غير أنه لا تكون هناك نهايات عظمى ذوات رتب أعلى . وإذا كانت المبعثرات كلها متفقة في الطور ، حصلنا على نهاية عظمى في المنحى $\theta_2 = 0$ ، وعلى نهاية صغرى عندما يكون $\Delta$ مساوياً $\lambda$ ، تماماً كما هو الأمر من أجل قيمتين منهيتين لـ $d$ و $n$ . وعليه فإن باستطاعتنا أن نحلل أيضاً توزعاً متصلاً للمبعثرات أو الهزازات، وذلك باستعمال عملية التكامل بدلاً من عملية الجمع.

فمثلاً ، افترض أن هناك خطاً طويلاً من الهزازات ، تكون فيه الشحنة مهتزة وفق منحى هذا الخط كما في الشكل (٣٠ – ٥) . إن أعظم شدة يولدها مثل هذا الصف من الهزازات تكون عمودية على الخط . وهناك جزء صغير من الشدة على جانبيْ المستوي الاستوائي ولكنه ضئيل جداً . ويمكننا بفضل هذه النتيجة

أن نعالج حالة أشد تعقيداً . افترض أن لدينا مجموعة خطوط كالخط السابق ، يولد كل خط منهـا حزمة في مستوٍ عمودي على الخط فقط . إن مسألة إيجاد الشدة في مناحٍ مختلفة ، عندما يكون ما يولدهـا سلسلة من الأسلاك الطويلة عوضاً عن أسلاك غير متناهية في الصغر ، هي عين المسألة كما كانت في حالة أسلاك غير متناهية في الصغر ما دمنا في المستوي المركزي العمودي على الأسلاك ؛ فما علينا إلا أن نجمع إسهام كلٍ من الأسلاك الطويلة . وهذا يفسّر




الشكل ( ٣٠ - ٥ )

نمط الشدة في حالة صف متصل من الهزازات ، له نهاية عظمى شديدة واحدة و « فصوص جانبية » ضعيفة عديدة

إمكان استعمالنا شبكة ذات شقوق ضيقة وطويلة بالرغم من أن ما درسناه فعلاً هو هوائيات صغيرة فقط . فكل شق من الشقوق الطويلة يولد أثراً في منحاه الخاص فقط ، لا في المنحى العمودي عليه ، ولكنها كلها مصفوفة أفقياً جنباً إلى جنب ، وبذلك تولد ظواهر التداخل على هذا الشكل .

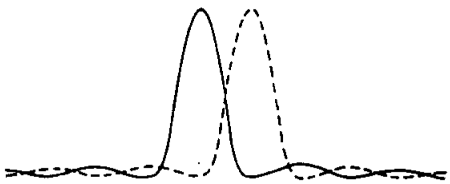
وعلى هذا فإنه يمكننا أن نصل إلى حالات أكثر تعقيداً بأن تكون لدينا توزيعـات مختلفة للمبعثِرات في خطوط أو في مستويات أو في الفراغ . لقد كان أول ما فعلناه هو النظر في مبعثرات على خط واحد ، وقد وسعنا الدراسة منذ قليل لتشمل حزوزاً ؛ ويمكننا أن نقوم بذلك بإجراء عمليات الجمع الضرورية ليس إلا ، وذلك بجمع الإسهامات التي يسهم بها كل من المبعثرات الفردية . فالمبدأ واحد دائماً .

## ٣٠ — ٣ : مقدرة الفصل في الشبكة  Resolving power of grating

لقد أصبحنا الآن في وضع يسمح لنا بفهم عدد من الظواهر الهامة . مثلاً ، استعمال شبكة للفصل بين الأطوال الموجية . لقد وجدنا أن الطيف كله يمتد على الشاشة ، لذلك يمكن استعمال الشبكة أداة لتحليل الضوء إلى أطواله الموجية المختلفة . إن أحد الأسئلة الهامة هو السؤال التالي : إذا افترضنا أن هناك منبعين مختلفين اختلافاً طفيفاً في التواتر أو في طول الموجة ، فكم يمكن أن يبلغ التقارب بين طوليهما الموجيين حتى تعجز الشبكة عن إظهار أن هناك حقاً طولين موجيين مختلفين ؟ إن الأحمر والأزرق يظهران منفصلين انفصالاً واضحاً . ولكن عندما تكون إحدى الموجتين حمراء والموجة الأخرى أشد منها حمرة بمقدار طفيف ، أي تكون الموجتان متقاربتين تقارباً مفرطاً ، فكم يمكن أن يبلغ هذا التقارب بينهما ؟ إن هذا يسمى مقدرة الفصل للشبكة ، وإحدى الطرق في دراسة المسألة هي كما يلي : افترض أنه من أجل ضوء ذي لون معين وجدنا أن النهاية العظمى للحزمة المنعرجة تقع في منحى يصنع زاوية معينة . فإذا غيرنا طول الموجة فإن الطور $2\pi d \sin\theta/\lambda$ يختلف ، ويتبع هذا طبعاً أن تقع النهاية العظمى في منحى يصنع زاوية مختلفة . وهذا هو السبب في أن الأحمر والأزرق يتباعدان . فكم ينبغي أن يكون الاختلاف في الزاوية حتى يكون باستطاعتنا أن نرى الضوءين منفصلين ؟ إننا بالطبع نعجز عن رؤيتهما منفصلين إذا كانت النهاية العظمى لأحدهما منطبقة تمام الانطباق على النهاية العظمى للآخر . وإذا كانت النهاية العظمى لأحد الضوءين بعيدة بعداً كافياً عن النهاية العظمى للضوء الآخر ، فإنه يمكننا أن نرى أن هناك نتوءين في توزع الضوء . ولكي نكاد نكون قادرين على التمييز بين النتوءين ، يتبع عادة المعيار البسيط التالي المسمى معيار ريلي، انظر الشكل (٣٠-٦) . وهو يقضي أن تكون

النهاية الصغرى الأولى لأحد النتوءين واقعة عند النهاية العظمى للنتوء الآخر . ومن السهل جداً الآن أن نحسب كم يبلغ الفرق بين الطولين الموجيين عندما تقع النهاية الصغرى الأولى الموافقة لأحدهما عند النهاية العظمى للثاني . وأفضل طريقة للقيام بذلك هي الطريقة الهندسية .

لكي نحصل على نهاية عظمى من أجل طول موجي $\lambda'$ ، ينبغي أن يكون فرق المسير $\Delta$ في الشكل (٣٠ - ٣) مساوياً $n\lambda'$ ، وإذا كنا ننظر إلى الحزمة ذات الرتبة m فإنه ينبغي أن يكون مساوياً $mn\lambda'$ . أي بعبارة أخرى ،



الشكل ( ٣٠ - ٦ )

توضيح معيار ريلي . النهاية العظمى لاحد النمطين تقع عند النهاية الصغرى الاولى للآخر

لدينا : $2\pi d \sin\theta / \lambda' = 2\pi m$ ، إذن فإن $d \sin\theta = m\lambda'$ وعليه فإن $n d \sin\theta$ ، الذي هو فرق المسير $\Delta$ ، يساوي : $mn\lambda'$ . ومن أجل الحزمة الأخرى ذات الطول الموجي $\lambda$ ، نود أن تكون لدينا نهاية صغرى عند الزاوية $\theta$ نفسها . أي نود أن يكون $\Delta$ مساوياً بالضبط طولاً موجياً $\lambda$ زيادة عن $mn\lambda$ . أي أن يكون $\Delta = mn\lambda + \lambda = mn\lambda'$ . وعليه إذا كان $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ ، فإننا نجد :

$$\Delta\lambda / \lambda = 1 / mn \qquad (30-9)$$

وتسمى النسبة $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ مقدرة الفصل للشبكة ؛ ونرى أنها تساوي جداء العدد الكلي لحزوز الشبكة n بالرتبة m . وليس من الصعب إثبات أن هذه الصيغة مكافئة للصيغة القائلة إن الخطأ في التواتر يساوي مقلوب الفرق الزمني بين المسارين المتطرفين القابلين للتداخل* أي أن :

$$\Delta\nu = 1/T$$

وفي الحقيقة ، إن هذه هي خير طريقة لتذكر تلك الصيغة ، لأن الصيغة العامة لا تصلح للشبكات فحسب ، بل تصلح لأي أداة أخرى مهما كانت ، بينما تتوقف الصيغة الخاصة (9 – 30) على أن مانستعمله هو شبكة انعراج .

## ٣٠ — ٤ : الهوائي المكافئي

The parabolic antenna

لننظر الآن في مسألة أخرى من مسائل مقدرة الفصل . وهي التي تتعلق بهوائي نظارة راديوية تستعمل لتحديد مواضع منابع راديوية في السماء ، أي كم يبلغ مجالها الزاوي . وبالطبع اذا استعملنا أياً من الهوائيات القديمة ووجدنا الإشارات ،فاننا لانستطيع أن نعرف من أي اتجاه ترد الينا ، ويهمنا كل الاهتمام معرفة ما اذا كان المنبع في هذا الموضع أو ذاك . وإحدى الطرق للوصول الى ذلك هي ان نقيم سلسلة كاملة من أسلاك ذوات القطبين المتساوية الأبعاد عن بعضها البعض على أرض استوائية . ثم نجمع كل أسلاك هذه الهوائيات ونصلها بجهاز استقبال واحد ، بحيث تكون كل التأخرات في خطوط التغذية متساوية.

* في حالتنا هذه ، لدينا $T = \Delta/c = m\,n\,\lambda/c$ ، حيث c : سرعة الضوء ، ولكن التواتر $\nu = c/\lambda$ ، إذن $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda^2$ .

وبذلك يستقبل الجهازمن ذوات القطبين كلها اشارات متفقة في الطور. أي ، أنه يجمع كل الأمواج من كل ٍ من ذوات القطبين في الطور نفسه . فماذا يحصل الآن ؟ اذا كان المنبع يقع مباشرة فوق صف الهوائيات في اللانهاية أو نحو ذلك، فإن امواجه الراديوية تهيج كل الهوائيات بطور واحـــد ، أي أنها كلها تغذي جهاز الاستقبال معاً .

افترض الآن أن المنبع الراديوي يميل على الشاقول بزاوية ضئيلة θ . حينئذ تستقبل الهوائيات المختلفة اشارات تكون مختلفة في الطور اختلافاً ضئيلاً . فجهاز الاستقبال يجمع معاً كل هذه الاشارات المختلفة في الطور ، وبذلك لا نحصل على أي اشارة عندما تكون الزاوية θ مفرطة في الكبر . فكم يمكن ان يبلغ كبرَ هذه الزاوية؟ والجواب هو : نحصل على اشارة منعدمة اذا كانت الزاوية $\theta = \Delta / L$ ، انظر الشكل (٣٠ – ٣)، تقابل تغيراً في الطور يساوي 360° ، أي اذا كان Δ يساوي الطول الموجي λ . ذلك لأن إسهامات المتجهات تؤلف معاً مضلعاً كاملاً حاصلته منعدمة . فأصغر زاوية يمكن تمييزها بصف من الهوائيات طوله L تساوي $\theta = \lambda / L$ . لاحظ أن نمط الإستقبال بهوائي كالهوائي السابق هو بالضبط كتوزع الشدة الذي يمكن أن نحصل عليه فيما اذا قلبنا جهاز الاستقبال الى جهاز إرسال . وهذا هو مثال على ما يسمى مبدأ التبادل . وفي الحقيقة ، يتبين أن الامر التالي صحيح بوجه عام من أجل أي ترتيب للهوائيات والزوايا وما إلى ذلك ، وهو أنه إذا حصلنا أولاً على ما يمكن ان تكون عليه الشدات النسبية في مناحٍ مختلفة فيما لو كان المستقبل مرسلاً، فإن الحساسية النسبية للاتجاه من أجل مستقبل له التوصيلات الخارجية نفسها وصف الهوائيات نفسه، هي نفس ما يمكن أن تكون عليه الشدة النسبية للإصدار فيما لو كان المستقبل مرسلاً .

وتُصنع بعض هوائيات الراديو على نحوٍ مختلف . فبدلاً من أن يكون لدينا عدد من ذوات القطبين في صف طويل ، وعدد من أسلاك التغذية ، يمكننا

أن نرتبها وفق منحنٍ بدلاً من المستقيم، وأن نضع المستقبل في نقطة معينة حيث يمكنه كشف الأمواج المبعثرة . وهـذا المنحني مصمم تصميماً بارعاً بحيث إذا وردت الأمواج الراديوية من الأعلى وبعثرتها الأسلاك مولدةً موجة جديدة ، فإن الأسلاك تكون مرتبة بحيث تصل الأمواج المبعثرة إلى المستقبل كلهـا في وقت واحد ، انظر الشكل (٢٦ – ١٢). وبعبارة أخرى ، إن هذا المنحني هو قطع مكافيء ، وعندما يكون المنبع على محوره بالضبط ، نحصل على شدة كبيرة جداً في المحرق . ونفهم في هذه الحالة على نحوٍ واضح جداً ما هي مقدرة الفصل لمثل هذه الأداة . إن ترتيب الهوائيات وفق منحنٍ مكافئ ليس أمراً أساسياً ، فهو ليس إلا طريقة ملائمة لإيصال كل الإشارات الى النقطة نفسها دون أي تأخر نسبي ودون استعمال أسلاك تغذية . أما الزاوية التي تستطيع مثل هـذه الأداة تمييزها فهي ما تزال ايضاً $\theta = \lambda / L$ ، حيث يدل L على المسافة الفاصلة بين الهوائي الأول والهوائي الأخير . فهي لا تتوقف على المسافة الفاصلة بين هوائيين متجاورين ، بل يمكن أن تكون الهوائيات متجاورة تجاوراً مفرطاً ، أو أن تكون في الحقيقة كلها قطعة معدنية واحدة . وما نصفه الآن هو بالطبع نظارة ذات مرآة . لقد سبق أن وجدنا مقدرة الفصل للنظارة ! (تكتب مقدرة الفصل أحياناً بالشكل $\theta = 1.22\, \lambda / L$ حيث يدل L على قطر النظارة . والسبب في أنها لاتساوي $\lambda / L$ تماماً هو ما يلي : عندما حصلنا على $\theta = \lambda / L$ ، افترضنا أن كل صفوف ذوات القطبين متساوية في شدتها ، ولكن عندما تكون لدينا نظارة دائرية ، وهي الطريقة المتبعة عادة في صنع النظارة ، فإن الإشارة التي تصلنا من الاطراف الخارجية تكون أقل مما يصلنا من الأجزاء المركزية ، لأن الدائرة لا تشبه المربع الذي يعطينا الشدة نفسها على طول ضلعه . ونحصل على مـا هو أقل بعض الشيء لأننا لانستعمل إلا جزءاً من النظارة هناك؛ وعلى هذا نستطيع أن ندرك أن القطر الفعال اصغر قليلاً من القطر الحقيقي ، وهذا هو ما ينبئنا

به العامل 1.22 . ويبدو ، على كل حال ، أن من الحذلقة استعمال مثل هذه الدقة في صيغة مقدرة الفصل* .

## ٣٠ ــ ٥ : الاغشية الملونة ؛ البلورات Colored films , Crystals

إن الأمور السابقة هي إذن بعض آثار التداخل التي نحصل عليها بجمع الأمواج المختلفة . ولكن هناك عدداً من الأمثلة الأخرى ، وبالرغم من أننا ما زلنا لا نفهم الآلية الاساسية حتى الآن، فإنه سوف يتم لنا ذلك يوماً ما ، ولكننا الآن نفهم كيف يتم التداخل . فمثلاً ، عندما يصدم ضوء سطحاً مادياً قرينة انكساره n ، ولنقل إن الورود ناظمي ، فإن بعض الضوء ينعكس . أمـــا السبب في الانعكاس فلسنا الآن في وضع يسمح لنا بفهمه ؛ وسنناقش ذلك فيما بعد . لكن لنفترض أن بعض الضوء ينعكس لدى دخوله الوسط الكاسر ولدى بروزه منه . حينئذ ، إذا نظرنا إلى انعكاس منبع ضوئي في غشاء رقيق ، فإننا نرى مجموع موجتين ؛ وإذا كانت الثخانات صغيرة صغراً كافياً ، فان هاتين الموجتين تولّدان تداخلاً ، يمكن أن يكون بنّاء أو هدّاماً ، حسبما تكون إشارات الأطوار . فمثلاً ، يمكن أن نحصل من اجل الضوء الأحمر على انعكاس مشتد، بينما قد نحصل ، من اجل الضوء الأزرق الذي يختلف عنه في طول الموجة ، على انعكاس التداخل فيه هدّام ، بحيث نرى ضوءاً منعكساً شديد الحمرة . وإذا غيّرنا الثخن ، بأن ننظر إلى موضع آخر حيث يكون الغشاء اكثر ثخناً ، فقد

---

★ ذلك لأن معيار رايلي فكرة تقريبية قبل كل شيء . إنه ينبئك أين يبدأ الأمر بأن يصبح من الصعب جداً القول فيما اذا كان الخيال مكوناً من نجمين او من نجم واحد . وفي الواقع ، إذا كان بالإمكان ان تجرى بعناية كافية قياسات التوزع المضبوط للشدة في بقعة الانعراج التي تكوّن الخيال ، فإنه يمكن إثبات ان بقعة الانعراج يولدها منبعان حتى وإن كانت $\theta$ اقل من $\lambda/L$ .

ينعكس الأمر ، فيكون تداخل الأحمر هدّاماً دون الأزرق ، ويظهر ضوء ساطع يمكن أن يكون أزرق أو أخضر أو أصفر أو أي لون آخر . وهكذا عندما ننظر الى اغشية رقيقة نرى ألواناً، وتتغير هذه الألوان عندما ننظر بزوايا مختلفة ، ذلك لأننا ندرك أن فروق الطور تختلف باختلاف الزوايا . وعلى غير انتظار ، ندرك مئات الآلاف من الحالات الأخرى التي تتعلق بالألوان التي نراها على أغشية الزيت وفقاعات الصابون ، الخ عندما ننظر اليها بزوايا مختلفة. ولكن المبدأ واحد من اجلها جميعاً : فنحن إنما نجمع أمواجاً بأطوار مختلفة .

ويمكن أن نذكر ما يلي كتطبيق آخر هام من تطبيقات الانعراج . لقد استعملنا شبكة ورأينا الخيال المنعرج على الحاجز . ولو كنا استعملنا ضوءاً وحيد اللون ، لوقع الخيال في موضع معين ، كذلك تكون هناك ايضاً أخيلة مختلفة من رتب اعلى . ويمكننا ، بمعرفة مواضع هذه الأخيلة ، ان نحسب البعد الفاصل بين حزوز الشبكة فيما اذا عرفنا طول موجة الضوء . كذلك يمكننا ، بمعرفة اختلاف الشدة ما بين الأخيلة المختلفة، أن نكتشف شكل حزوز الشبكة، فيما اذا كانت مصنوعة من اسلاك ، او اذا كانت حزوزها كأسنان المنشار ، او من اي شكل آخر ، وذلك دون أن يكون باستطاعتنا رؤية هذه الحزوز .

ويستعمل هذا المبدأ لاكتشاف مواضع الذرات في بلّورة ما . والتعقيد الوحيد هو ان البلّورة ذات ثلاثة أبعاد ؛ وهي تكرار لترتيب للذرات ذي ثلاثة أبعاد. ولا نستطيع في هذه الحالة استعمال ضوء عادي ، لأنه ينبغي ان نستعمل شيئاً يكون طول موجته أصغر من المسافة الفاصلة بين الذرات وإلا فاننا لا نحصل على أي أثر ، لذلك ينبغي ان نستعمل إشعاعاً ذا طول موجي قصير جداً ، أي الاشعة السينية. وعلى هذا، باسقاط الاشعة السينية على بلّورة ما ، وبملاحظة ما يكون عليه الانعكاس من شدة في الرتب المختلفة ، نستطيع أن نعين ترتيب الذرات في داخل البلورة ، دونما حاجة اطلاقاً الى رؤية هذه الذرات بالعين ! وهذه هي الطريقة التي عرفنا بها ترتيب الذرات في المواد المختلفة ، فمكّننا ذلك

من ان نرسم في الفصل الاول تلك الصور التي تُظهر ترتيب الذرات في الملح وغير ذلك . وسوف نعود فيما بعد الى هذا الموضوع ونناقشه على نحو أعمق ، لذلك لن نضيف في الوقت الحاضر شيئاً الى ما ذكرناه عن هذه الفكرة الرائعة .

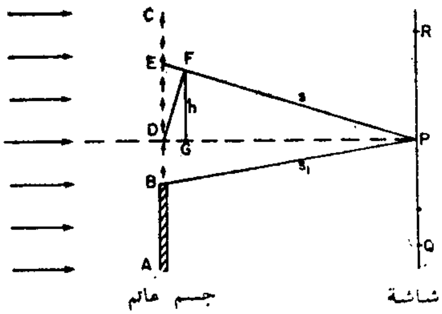
### ٣٠ — ٦ : الانعراج عند حواجز عاتمة

Diffraction by opaque screens.

ننظر الآن في حالة ذات شأن كبير . لنفترض أن لدينا لوحاً عاتماً فيه ثقوب ، وأن هناك ضوءاً في أحد جانبيه . ونود أن نعرف ما تكون عليه الشدة في الجانب الآخر . إن ما يقوله معظم الناس هو ان الضوء ينير من خلال الثقوب ويحدث أثراً على الجانب الآخر . ويتبين أن المرء يجد الجواب الصحيح بتقريب ممتاز ، فيما اذا افترض ان هناك منابع موزعة بكثافة منتظمة في الثقوب المفتوحة ، وان أطوار هذه المنابع واحدة كما هو الأمر فيما لو لم تكن المادة العاتمة موجودة . ولا شك ، انه ليست هناك فعلاً منابع في الثقوب ، بل ان مواضعها في الحقيقة هي المواضع الوحيدة التي لا تكون فيها منابع بلا ريب . ومع ذلك ، فاننا نحصل على انماط الانعراج الصحيحة بأن ننظر الى الثقوب على انها المواضع الوحيدة التي تكون فيها منابع ؛ وهذا امر عجيب حقاً . وسوف نشرح فيما بعد سبب صحة هـذا الامر ، ولكن لنكتف في الوقت الحاضر بافتراض ان هذا الامر صحيح .

هنـاك في نظرية الانعراج نوع آخر من الانعراج ينبغي علينـا مناقشته باختصار . وهو عادة لا يناقش في دراسة اولية مبكرة كهذه الدراسة ، لسبب واحد هو ان الصيغ الرياضية المستعملة في جمع تلك المتجهات الصغيرة معقدة بعض الشيء . وفيما عدا ذلك فإنها تماثل تماماً ما كنا نقوم به فيما سبق . إن كل ظواهر التداخل متماثلة وواحدة ؛ وليس هناك ما هو اكثر تقدماً بكثير ، إنما تكون الظروف اكثر تعقيداً ويكون من الاصعب جمع المتجهات مع بعضها البعض ، وهذا هو كل ما في الامر .

لنفترض ان لدينا ضوءاً يرد من اللانهاية ، مُلـْقياً ظلاً لجسم ما . ويبين الشكل (٣٠ - ٧) حاجزاً يتكون عليه ظل جسم AB بفعل منبع ضوئي بعيد

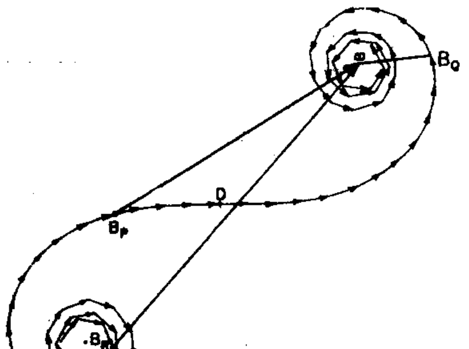



الشكل (٣٠ - ٧)
منبع ضوئي بعيد يلقي ظل جسم عاتم على حاجز

جداً اذا قورن بُعده بطول الموجة. اننا قد نتوقع ان الشدة كبيرة خارج الظل وان هناك ظلاماً تاماً داخله . ولكن في الحقيقة ، إذا رسمنا الشدة بدلالة الموضع بالقرب من طرف الظل ، فإننا نجـد ان الشدة تزداد ثم تتعدى هـذا الطرف وتتذبذب مهتزة بطريقة غريبة جداً بالقرب من هذا الطرف كما في الشكل (٣٠-٩) . لنناقش الآن سبب ذلك . فإذا استعملنا الدعوى التي لم نبرهن عليها حتى الآن ، فاننا نستطيع حينئذ ان نستعيض عن المسألة الفعلية بمجموعة من المنابع الفعالة الموزعة توزيعاً منتظماً على الجزء المكشوف ما فوق الجسم .

نتصور عـدداً كبيراً من الهوائيات المتجاورة تجاوراً مفرطاً ، ونود معرفة الشدة في نقطة ما P . إن هذا يكاد يشبه ما كنا نقوم به ، ولكن الشبه ليس تاماً لأن شاشتنا لا تقع في اللانهاية . فنحن لا نبغي معرفـة الشدة في اللانهاية بل عند نقطة محدودة البعد . ولحساب الشدة في مكان ما معين ، علينا أن نجمع إسهامات كل الهوائيات . هناك أولاً هوائي عند D ، مقابل P تماماً ؛ فإذا

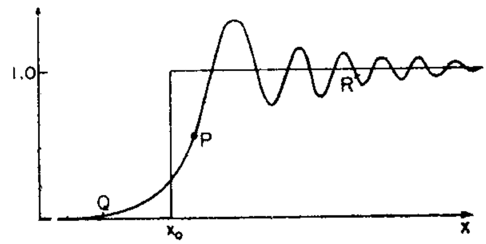
انتقلنا إلى الأعلى قليلاً ولنقل إلى ارتفاع h ، فإنه يكون هناك ازدياد في التأخر ( ويكون هناك أيضاً تغير في السعة بسبب تغير المسافة ، ولكن أثر ذلك صغير جداً إذا كنا على بعدٍ كبير ، وهو تغير أقل شأناً بكثير من فروق الطور ) .
إن فرق المسير EP − DP يساوي $h^2/2S$ ، أي أن فرق الطور يتناسب مع مربع ابتعادنا عن D ، بينما كان فرق الطور في عملنا السابق ، عندما كان S لا نهائياً ، يتناسب خطياً مع h . وحينما تكون الأطوار متناسبة خطياً ، تُجمع كل متجهة مع التي تليها وبينهما زاوية ثابتة . أما الآن ، فإن ما نحتاجه هو منحنٍ يتكون بجمع عدد كبير من المتجهات غير المتناهية في الصغر بحيث تكون الزوايا التي تصنعها متزايدة ، لا تزايداً خطياً ، بل تزايداً يتناسب مع مربع طول المنحني . إن تكوين هذا المنحني يتطلب رياضيات متقدمة بعض الشيء ، ولكننا نستطيع مع ذلك تكوينه في الواقع بأن نرسم المتجهات وأن نقيس الزوايا . وعلى كلٍ ، فإننا نحصل على المنحنى الرائع ( المسمى حلزون كورنو ) المبين في الشكل (٣٠ − ٨) . والآن كيف نستعمل هذا المنحني ؟
إذا أردنا الشدة عند النقطة P مثلاً ، فإننا نجمع عدداً من إسهامات الأطوار




الشكل (٣٠−٨)
جمع السعات العائدة لعددٍ من الهزازات المتفقة في الطور والتي تتغير تأخرات طورها بحيث تتناسب مع مربع البعد عن النقطة D في الشكل (٣٠ − ٧)

المختلفة من النقطة D حتى اللانهاية في الأعلى ، ومن النقطة D حتى النقطة $B_P$ فقط في الأسفل. وعلى هذا ، نبدأ بالنقطة $B_P$ في الشكل (٣٠-٨) ونرسم سلسلة من الأسهم التي تزداد زواياها باستمرار . فالإسهام الكلي لما هو فوق النقطة $B_P$ يساوي إذن المنحني الحلزوني . ولو أن علينا أن نوقف التكامل عند موضع ما ، لكانت السعة الكلية متجهة بدايتها عند B ونهايتها عند تلك النقطة ؛ وفي مسألتنا الخاصة هذه نستمر حتى اللانهاية ، فالجواب الكلي هو إذن المتجهة $B_{P\infty}$ .

والآن ، إن الموضع على المنحني الذي يقابل النقطة $B_P$ على الجسم يتوقف على موقع النقطة P ، لأن النقطة D ، نقطة الانعطاف ، تقابل دائماً موضع النقطة P . وهكذا ، فإنه حسب موقع P فوق B ، تقع نقطة البداية في مواضع مختلفة على الجزء السفلي الأيسر من المنحني ، وتكون للمتجهة الحاصلة $B_{P\infty}$ عدة نهايات عظمى وصغرى كما في الشكل (٣٠ - ٩) .




الشكل (٣٠ - ٩)
الشدة بالقرب من طرف الظل . حد الظل الهندسي يقع عند $x_0$

ومن جهة أخرى ، إذا كنا في النقطة Q على الجانب الآخر من P ، فإننا نستعمل طرفاً واحداً فقط من المنحني الحلزوني دون الجانب الآخر . وبعبارة أخرى ، إننا لا نبدأ حتى من النقطة D بل من النقطة $B_Q$ ، وعلى هذا فإننا نحصل في هـذا الجانب على شدة تتناقص باستمرار كلما ابتعدت Q داخل الظل .

إن إحدى النقاط التي يمكننا حسابها بسهولة على الفور ، لإظهار أننا نفهم الأمر حقاً ، هي الشدة المقابلة لطرف الجسم تماماً . إن هذه الشدة تساوي رُبع شدة الضوء الوارد . والسبب هو كما يلي : عند الطرف تماماً [ حيث أن النقطة B إحدى نهايتيْ السهم تقع عند D في الشكل (٣٠ - ٨) ] يكون لدينا نصف المنحني الذي يمكن أن يكون لدينا فيما لو كنا على بعد كبير في المنطقة المضاءة . فإذا كانت النقطة R بعيدة جداً في المنطقة المضاءة فإنه يوافق ذلك انتقالنا من إحدى نهايتيْ المنحني إلى نهايته الأخرى ، أي متجهة الوحدة كاملةً ؛ ولكن عندما نكون عند طرف الظل ، يكون لدينا نصف السعة فقط ، أي ربع الشدة .

كنا في هذا الفصل في سبيل إيجاد الشدة التي تولدها في اتجاهات مختلفة توزعات للمنابع مختلفة . وكمثال ختامي ، سوف نشتق صيغة نحتاج إليها في الفصل التالي عن نظرية قرينة الانكسار . وقد كانت الشدات النسبية حتى الآن كافية لمقصدنا ، ولكننا في هذه المرة سوف نجد الصيغة الكاملة من أجل الحقل في الحالة التالية .

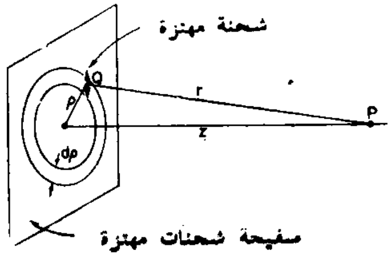
## ٣٠ ـ ٧ : الحقل المتولد عن مستوٍ من الشحنات المهتزة

The field of plane of oscillating charges.

نفترض أن لدينا مستوياً مليئاً بالمنابع التي تهتز كلها معاً وحركتها في المستوي ولها كلها سعة واحدة وطور واحد . فماذا يكون الحقل على بعد منتهٍ من المستوي ولكن كبير جداً ؟ ( اننا لا نستطيع الاقتراب كثيراً بالطبع ، إذ ليست لدينا الصيغ الخاصة بالحقل في جوار المنابع ) . فإذا جعلنا مستوي الشحنات المستوي XY ، فإننا نود حينئذ إيجاد الحقل عند النقطة P البعيدة والواقعة على المحور Z في الشكل (٣٠ – ١٠ ) . نفترض أن هناك n شحنة في وحدة المساحة من المستوي ، وأن شحنة كل منها تساوي q . وتتحرك جميع

الشحنات حركة توافقية بسيطة في منحى واحد وبسعة واحدة وبطور واحد . لتكن حركة كل شحنة ، بالنسبة لوضعها المتوسط الخاص بها معطى بالعلاقة $x_0 \cos \omega t$ . وعليه ، فباستعمال الرموز العقدية وبتذكر أن الجزء الحقيقي يمثل الحركة الفعلية فإنه يمكن تمثيل الحركة بالمقدار $x_0 e^{i\omega t}$ .

ويتم إيجاد الحقل في النقطة P الناجم عن كل الشحنات بإيجاد الحقل الذي تولده فيها كل شحنة q ، ثم جمع إسهامات كل الشحنات . ونحن نعرف




الشكل (٣٠ - ١٠)
حقل الاشعاع لوريقة من الشحنات المهتزة

أن حقل الإشعاع يتناسب مع تسارع الشحنة الذي يساوي $-\omega^2 x_0 e^{i\omega t}$ ( وهو نفسه من أجل كل شحنة ) . أما الحقل الكهربائي في النقطة P العائد لشحنة واقعة عند النقطة Q فيتناسب مع تسارع الشحنة q ، ولكن علينا أن نتذكر أن الحقل في النقطة P في اللحظة t يُعطى بتسارع الشحنة في زمن سابق $t' = t - r/c$ ، حيث $r/c$ هو الزمن الذي تستغرقه الأمواج في قطعها المسافة r من Q إلى P . إذن فالحقل في النقطة P يتناسب مع :

$$-\omega^2 x_0 e^{i\omega(t - r/c)} \qquad (30\text{-}10)$$

وباستعمال هذه القيمة للتسارع كما يُرى من P في صيغة الحقل الكهربائي على

مسافات بعيدة من شحنة مشعة ، نحصل على ما يلي بصورة تقريبية :

$$\left(\begin{matrix} \text{الحقل الكهربائي في } P \\ \text{لشحنة واقعة عند } Q \end{matrix}\right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{\omega^2 x_0 e^{i\omega(t - r/c)}}{r} \qquad (30-11)$$

وليست هذه الصيغة صحيحة كل الصحة ، إذ كان علينا ألا نستعمل تسارع الشحنة بل مركبته العمودية على الخط QP . ولكننا سنفترض ، من أجل تلك التغيرات التي ينبغي أن نأخذها بعين الاعتبار ، أن النقطة P بعيدة جداً بالنسبة لبعد النقطة Q عن المحور [ البعد بين Q والمحور هو المسافة $\rho$ المبينة في الشكل( ٣٠ – ١٠ ) ] ، بحيث يمكننا إهمال عامل جيب التام ( الذي يساوي الواحد تقريباً على كل حال ) .

وللحصول على الحقل الكلي عند P ، نجمع الآن آثار كل الشحنات التي في المستوي . وينبغي طبعاً أن يكون الجمع جمعاً متجهاً . ولكن ما دام منحى الحقل الكهربائي واحداً تقريباً من أجل كل الشحنات ، فإنه ليس علينا إلا أن نجمع قيم الحقل جمعاً ، مع الحفاظ على التقريب الذي سبق أن حدّدناه . وبهذا التقريب ، لا يتوقف الحقل عند P إلا على المسافة r ، بحيث أن كل الشحنات التي تقع على البعد r نفسه تولد حقولاً متساوية . وعلى هذا ، نجمع أولاً حقول الشحنات الواقعة على حلقة عرضها $d\rho$ ونصف قطرها $\rho$ . ثم نحصل على الحقل الكلي بإجراء التكامل من أجل كل قيم $\rho$ .

إن عدد الشحنات في الحلقة الواحدة يساوي جداء مساحة هذه الحلقة $2\pi\rho\, d\rho$ ، بعدد الشحنات في وحدة المساحة $\eta$ . فيكون لدينا إذن :

$$\text{الحقل الكلي في } P = \int \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 c^2} \frac{\omega^2 x_0 e^{i\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)}}{r}\, \eta \,.\, 2\pi\rho\, d\rho \qquad (30-12)$$

وما نبغيه هو تقدير هذا التكامل من $\rho = 0$ حتى $\rho = \infty$ . وينبغي طبعاً الحفاظ على المتحول t ثابتاً خلال إجراء التكامل، بحيث أن $\rho$ و r هما المقداران المتغيران الوحيدان . فإذا أهملنا في الوقت الحاضر العوامل الثابتة جميعاً بما في ذلك العامل $e^{i\omega t}$ ، فإن التكامل الذي نطلبه هو :

$$\int_{\rho=0}^{\rho=\infty} \frac{e^{-i\omega r/c}}{r} \rho \, d\rho \qquad (30-13)$$

ولإجراء هذا التكامل نحتاج إلى استعمال العلاقة بين r و $\rho$ وهي :

$$r^2 = \rho^2 + z^2 \qquad (30-14)$$

ولما كان z مستقلاً عن $\rho$ ، فإننا عندما نأخذ تفاضل هذه المعادلة نجد :

$$2r\,dr = 2\rho\,d\rho$$

وهو أمر مؤات، إذ يمكن أن نعوّض في تكاملنا عن $\rho\,d\rho$ بالمقدار $r\,dr$ فيختفي بذلك r في المخرج . ويصبح التكامل الذي نطلبه التكامل البسيط التالي :

$$\int_{r=z}^{r=\infty} e^{-i\omega r/c}\, dr \qquad (30-15)$$

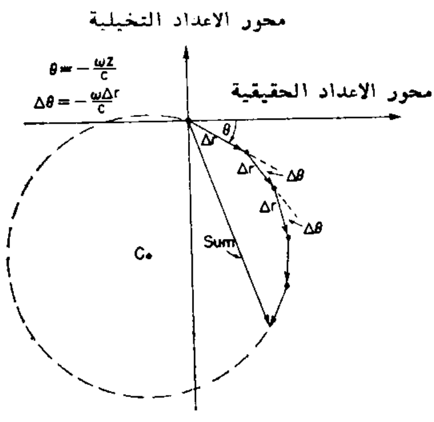
ان مكاملة تابع أسي أمر سهل جداً . نقسم على امثال r في الأس ونقدّر الأس عند الحدين . ولكن حدّيْ r ليسا كحدّيْ $\rho$ . فعندما $\rho = 0$ يكون $r = z$ ، فحدا r هما إذن z واللانهاية . ونحصل على قيمة التكامل وهي :

$$-\frac{c}{i\omega}\left[ e^{-i\infty} - e^{-(i\omega/c)z} \right] \qquad (30-16)$$

حيث كتبنا $\infty$ بدلاً من $\infty(\frac{r}{c})$ ، لأنهما كليهما يعنيان عدداً كبيراً جداً !

إن $e^{-i\infty}$ هو مقدار غامض . فالجزء الحقيقي فيه مثلاً هو $\cos(-\infty)$ ، وهو ، بلغة الرياضيات ، مقدار غير محدود على الإطلاق ( بالرغم من أننا نتوقع أن يكون في مكان ما أو في كل مكان (?) ، بين $1+$ و $1-$ ! ) . ولكنه بلغة الفيزياء ، قد يعني شيئاً معقولاً حقاً ، ويمكن عادة أن يؤخذ مساوياً الصفر تماماً. ولكي نتبين أن الأمر هو كذلك في حالتنا ، نعود الى النظر مرة أخرى في التكامل الأصلي ( 15 - 30 ) .

يمكننا أن نفهم ( 15 — 30 ) على أنه مجموع أعداد عقدية صغيرة كثيرة ، مقدار كل منها $\Delta r$ ، وزاويته $\theta = -\omega r/c$ في المستوي العقدي . ويمكننا أن نحاول تقدير المجموع بطريقة بيانية . لقد رسمنا في الشكل (٣٠-١١) الأجزاء




الشكل (٣٠-١١)

الحل البياني للتكامل $\int_z^{\infty} e^{-i\omega r/c} dr$

الخمسة الأولى من هذا المجموع . إن كل قطعة من المنحني ذات طول $\Delta r$ وتصنع مع القطعة السابقة زاوية $\Delta\theta = -\omega \Delta r/c$ . وقد مُثّل مجموع هذه الأجزاء الخمسة الأولى بالسهم الذي يبدأ بنقطةالبداية وينتهي بنهاية القطعة الخامسة. واذا

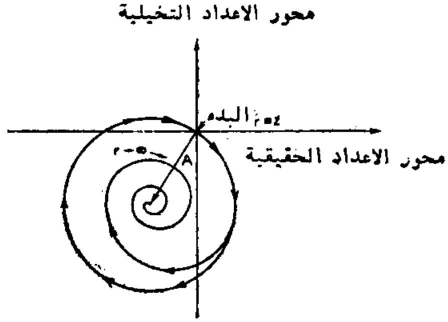
واصلنا جمع القطع فإننا نرسم بذلك مضلعاً حتى نعود الى نقطة البداية ( تقريباً ) ثم نبدأ بعدئذ بالدوران مرة أخرى . وبإضافة مزيد من القطع ، ندور مرات ومرات ، مع بقائنا في الجوار القريب جداً من دائرة يمكن أن نثبت بسهولة أن نصف قطرها يساوي $c/\omega$ . ويمكننا أن نتبين الآن لماذا لا يعطي التكامل جواباً محدداً .

ولكن علينا الآن ان نعود الى الوضع الفيزيائي . إن مستوي الشحنات في أية حالة حقيقية لا يمكنه أن يكون لا متناهياً في امتداده ،بل ينبغي ان يقف عند حد ما . فإذا هو توقف فجأة ، وكان شكله دائرياً تماماً ، فإنه يكون لتكاملنا قيمة ما على الدائرة في الشكل ( ٣٠ – ١١ ) . ومن ناحية ثانية ، اذا جعلنا عدد الشحنات في المستوي يتناقص تدريجياً على بعد كبير جداً من المركز (أو جعلناه يتوقف فجأة ولكن على نحو غير منتظم بحيث أنه من أجل قيم أكبر لـ $\rho$ ، لا يعود للحلقة ذات العرض $d\rho$ بكاملها أي اسهام ) ، فإن العامل $\eta$ في التكامل المضبوط يتناقص نحو الصفر . ولما كنا نجمع قطعاً أصغر فأصغر ولكنها مع ذلك لا تزال تدور بالزاوية نفسها ، فان الخط البياني لتكاملنا يصبح حينئذ منحنياً حلزونياً . وينتهي الحلزون في النهاية في مركز دائرتنا الأصلية ، كما هو مرسوم في الشكل ( ٣٠ – ١٢ ) . فالتكامل الصحيح فيزيائياً هو العدد العقدي A الممثل في الشكل بالمسافة من نقطة البداية الى مركز الدائرة ، والذي يساوي تماماً :

$$\frac{c}{i\omega}\, e^{-i\omega z/c} \qquad (30-17)$$

وهو ما يمكنك أن تصل اليه بنفسك . وهذه هي النتيجة نفسها التي يمكن أن نحصل عليها من المعادلة ( 16 – 30 ) فيما اذا جعلنا $e^{-i\infty}=0$ .

( وهناك أيضاً سبب آخر لتناقص الاسهام في التكامل عندما تكون قيم r




الشكل ( ٣٠ - ١٢ )

الحل البياني للتكامل $\int_z^\infty \eta e^{-i\omega r/c} dr$

كبيرة، وهو العامل الذي أسقطناه والمتعلق برتسم التسارع على المستوي العمودي على الخط PQ ) .

ولا شك أننا نهتم بالحالات الفيزيائية فقط، لذلك سوف نأخذ المقدار $e^{-i\infty}$ مساوياً الصفر . وإذا عدنا الى الصيغة الاصلية (12—30) الخاصة بالحقل ووضعنا فيها كل العوامل التي كان التكامل مضروباً بها ، فإننا نحصل على النتيجة التالية :

$$\text{الحقل الكلي عند P} = -\frac{\eta q}{2\varepsilon_0 c}\, i\omega x_0 e^{i\omega(t-z/c)} \qquad (30\text{—}18)$$

( علماً بأن $1/i = -i$ )

ومن المهم ملاحظة أن ( $i\omega x_0 e^{i\omega t}$ ) يساوي تماماً سرعة الشحنات ، بحيث أنه يمكننا أن نكتب معادلة الحقل كما يلي :

$$\text{الحقل الكلي عند P} = -\frac{\eta q}{2\varepsilon_0 c}\times \left[\text{سرعة الشحنات}\right]_{\text{في اللحظة } t-c/z} \qquad (30\text{—}19)$$

وهي علاقة غريبة بعض الشيء ، لأن التأخر يساوي المسافة $z$ فقط ، وهي أقصر مسافة ما بين $P$ ومستوي الشحنات. ولكن هكذا كانت النتيجة ، صيغة بسيطة حقاً لحسن الحظ . ( ويمكن أن نضيف ، في هذه المناسبة ، أنه بالرغم من أن اشتقاقنا لا يصح إلا من أجل المسافات البعيدة عن مستوي الشحنات المهتزة ، فإنه يتبين أن أياً من الصيغتين ( 18 – 30 ) أو ( 19 – 30 ) صحيحة من أجل أي مسافة $z$ ، حتى ولو كان $z < \lambda$ ) .

* * *

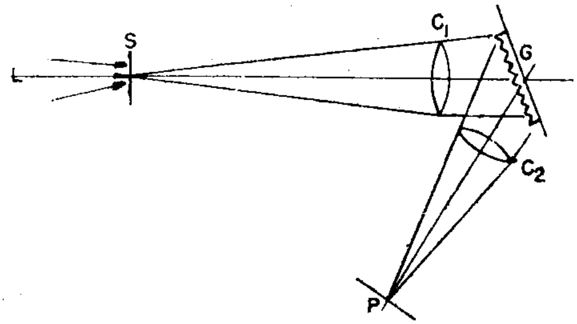
## مسائل وتمارين

٣٠-١ : يساوي طولا موجة لخطين D للصوديوم $5889.95\ A^\circ$ و $5895.92\ A^\circ$ على الترتيب . ما هو كِبَر شبكة الانعراج اللازمة للفصل بين هذين الخطين في الطيف من المرتبة الأولى إذا كان عـــدد حزوز الشبكة في الميلمتر الواحد 600 حزاً ؟

٣٠-٢ : تأتي سيارة ، تحمل الضوءين الكشافين العاديين في مقدمتهـا ، من مسافة بعيدة على طريق أفقية . ( ونفترض أن الضوءين منبعان نقطيان ) . فإذا كان البعد بين الضوئين على السيارة مساوياً 120 cm فما هو البعد بين السيارة ومشاهد يكاد يميز الضوئين كضوئين منفصلين وليس ضوءاً واحداً ؟ نفترض أن فتحة بؤبؤ عين الراصد تساوي 0.5 cm ، وأن طول موجة الضوء الفعلي يساوي $5500\ A^\circ$ . إن الضوء الأبيض ، كما نعلم ، خليط من أطوال أمواج مختلفة . فهل تجعل هذه الحقيقة التمييز بين المنبعين الضوئيين أمراً أصعب أم أسهل ؟

٣٠-٣ : يبين الشكل (٣٠-١٣) نموذجاً شائعاً لجهاز راسم للطيف يستخدم الشبكة المحززة . ويمر في هذا الجهاز ضوء صادر ، عن منبع L ، من شق ضيق S ، ثم من عدسة مجمعة ( أو من مرآة ) $C_1$ تجعله متوازياً ( بحيث يصطدم الضوء بالشبكة وكأنه موجة مستوية واردة من اللانهاية) . ثم ينعرج هذا الضوء المتوازي على الشبكة G ،

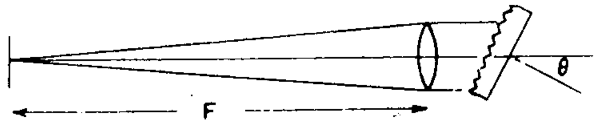
ويرد الضوء المنعرج ، ضمن مجال زاوي محدد ، عدسة أخرى $C_2$ تسمى عدسة آلة التصوير ، وهي عدسة يجري تحكيمها بحيث يكون محرقها في المستوي P ، وهناك يبدو الطيف على هيئة عصائب ، قد تقطعها خطوط طيفية ضيقة في مواضع متعددة .




الشكل ( ٣٠ - ١٣)

نفرض أن طول الشق هو h وأن عرضه هو w . ويساوي البعدان المحرقيان للعدستين $C_1$ و $C_2$ المقدارين $F_1$ و $F_2$ ، وتساوي الزاويتان بين الناظم ، على شبكة الانعراج ، ومحوري $C_1$ و $C_2$ المقدارين $\Theta_1$ و $\Theta_2$ ، ويساوي عدد حزوز الشبكة في المليمتر الواحد مقدار N . والمطلوب : ( أ ) ما هو عرض عصابة الطيف التي تبدو عند P ؟ (ب) ماهو طول الموجة s الذي يبدو على محور $C_2$ عند P ؟ (حـ) ما هو البعد ، في المستوي المحرقي ، عند P بين خطين يختلفان فيما بينهما بمقدار 1 A° ؟ تسمى هذه الكمية عادة تبديد الآلة . (د) إذا كان عرض الشق w أكبر بكثير من القدرة الفاصلة للعدسة المجمعة وهي $1.22\,\lambda F_1/A_1$ ، حيث $A_1$ فتحة العدسة ، فكم يصبح عرض الخط الطيفي عند P ؟

٣٠-٤ : يبين الشكل (٣٠-١٤) رسماً تخطيطياً لمطياف النظارة الشمسية في مرصد جبل ويلسن . والمطياف من نوع ليترو ، أما النظارة فهي على برج ارتفاعه 150 ft . وفي المطياف عدسة واحدة تعمل ، في آن




الشكل (٣٠ - ١٤)

واحد ، عمل عدسة المجمع وعمل عدسة آلة التصوير . وتساوي $\Theta_i$ المقدار $\Theta_d$ – تقريباً . ويتشكل الطيف على هيئة قصاصة قريبة من الشق . ويساوي البعد المحرقي F لآلة مرصد ويلسن مقدار 23 m ، أما شبكة الانعراج فهي محززة بـ 600 حز في المليمتر الواحد ، وتساوي المساحة المحززة 15 cm × 25 cm . ويستخدم عادة الطيف من المرتبة الخامسة . والمطلوب :

( أ ) ما هي الزاوية التي ينبغي أن تُمال بها شبكة الانعراج حتى ينطبق الخط الطيفي للحديد غير المؤين ، الذي طول موجته $\lambda = 5250.218$ A° ، على شق الدخول ، وذلك في الطيف من المرتبة الخامسة ؟

(ب) ما هي أطوال الموجة الأخرى الواقعة في المجال 7000 – 3600 انغستروم ، والتي تنطبق على الشق أيضاً ؟

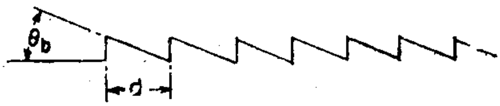
(ﺣ) اقترح طريقة بسيطة لإزالة المراتب غير المرغوب فيها ، بحيث تبقي على الطيف من المرتبة الخامسة وحسب .

(د) ما هو تبديد الآلة عند استعمال الطيف من المرتبة الخامسة وعند طول الموجة $\lambda = 5250$ A° ؟

(هـ) ما هي أدنى قيمة لـ $\Delta\lambda$ يمكن تمييزها نظرياً في الطيف من المرتبة الخامسة ، وعند طول الموجة $\lambda = 5250\ A^\circ$ ، في هذه الآلة ؟

٣٠-٥ : تقاس الأطوال الموجية للخطوط الطيفية حتى $0.001\ A^\circ$ ، وذلك باستخدام رواسم للطيف ، قد تساوي قدرتها الفاصلة $0.010\ A^\circ$ فقط . هل في ذلك تناقض مع أي مبدأ فيزيائي ؟ فسّر ذلك .

٣٠-٦ : يقال عن الشبكة ، التي تسمح حزوزها بتمرير الضوء إذا ورد بزاوية محدّدة ، بأنها شبكة براقة من أجل ذلك الاتجاه . نفترض أن باستطاعتنا جعل الحزوز بشكل أسنان منشار تماماً بحيث يميل سطح كل حز بزاوية معينة $\theta_b$ . والمطلوب :



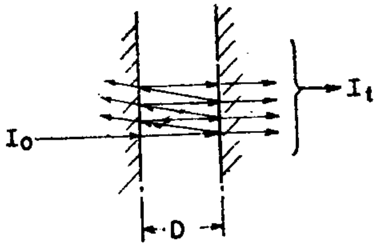
الشكل (٣٠-١٥)

( أ ) استخدم الاصطلاحات الخاصة بالأشعة ، التي تعاني انعراجاً ، والتي تعزو الاشعاع إلى هزازات في المادة مقسورة على الاهتزاز اهتزازاً متفقاً في الطور مع الاشعاع الوارد ، وذلك لاستنتاج الاتجاه الذي تصدر فيه الحزمة ، بعد انعراجها ، في أكبر شدة لها عندما تكون $\theta_i = 0$ .

(ب) حدّد بصورة تقريبية المجال الزاوي الذي يمتد إليه البريق .

٣٠-٧ : يتألف مقياس التداخل لبيرو وفابري من زوجين من السطوح المستوية تماماً ، متوازيين فيما بينهما ، وتفصلهما مسافة D . يطلى السطحان بحيث ينعكس جزء $R^2$ من الضوء الوارد عليهما ناظمياً ،

وينفذ جزء $T^2$ . ويرد ضوء شدته $I_0$ ، وطول موجته $\lambda$ ، على أحد السطحين من اليسار ، انظر الشكل (٣٠ – ١٦) ، فينفذ جزء من




الشكل (٣٠ – ١٦)

الضوء عبر الجملة ، وينعكس جزء آخر على السطح الثاني ، ثم على السطح الأول ، ثم ينفذ . ويكون الضوء النافذ ، في الحالة العامة ، مؤلفاً من ضوء لم يحصل له انعكاس ، وضوء قد انعكس مرتين ، أو أربع مرات ، أو ست مرات الخ . . . ، ونفذ من خلال طبقتين . بيّن كيف ترتبط الشدة النافذة بـ D و $\lambda$ و R و T ؟

**ملاحظة** : تسمى المرشحات الضوئية ذات العُصابات الضيقة ، بالمرشحات التداخلية ، وهي تعمل على المبدأ السابق نفسه . إلا أن السطحين العاكسين فيها مصنوعان بطريقة تلبيس الزجاج ، في خلاء شديد ، بطبقات عديدة ، قد اختير ثخنها بدقة ، وصنعت من مواد شفافة لها قرائن انكسار متفاوتة .

* * *

# الفصل الحادي والثلاثون

## منشأ قرينة الانكسار

The Origin of the Refractive Index

### ٣١ — ١ : قرينة الانكسار

ذكرنا من قبل أن الضوء ينتشر في الماء بأبطأ من انتشاره في الهواء ، وينتشر في الهواء أبطأ قليلاً من انتشاره في الخلاء . ويعبّر عن هذا الأثر بقرينة الانكسار n . ونود الآن معرفة كيف يمكن أن تحدث مثل هـــذه السرعة الأبطأ . وسنحاول ، بوجه خاص ، أن نرى ما هي علاقة ذلك ببعض الافتراضات أو البيانات الفيزيائية التي ذكرناها من قبل وهي التالية :

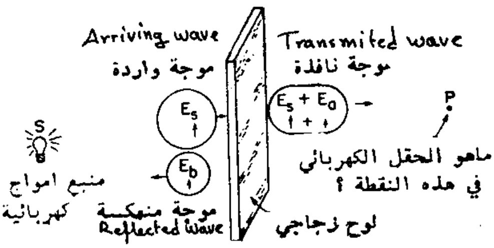
أ ـ أن الحقل الكهربائي الكلي في أي ظرف فيزيائي يمكن تمثيله دائمـاً بمجموع الحقول المتولدة عن كل الشحنات في العالم .

ب ـ أن الحقل المتولد عن شحنة واحدة يُعطى بتسارعهـا الذي ينبغي حسابه مع أخذ التأخر بعين الاعتبار ، هذا التأخر الذي يتم دوماً بالسرعـة c ، ( وذلك من أجل حقل الإشعاع ) .

ولكن يمكنك ، في حالة قطعة من الزجاج ، أن تفكر وتقول : « لا ، ينبغي عليك أن تعدّل كل هذا . وعليك أن تقول بأن التأخر يتم بالسرعة c/n» ولكن هذا غير صحيح ، وعلينا أن نفهم لماذا هو كذلك .

إنه صحيح على وجه التقريب أن الضوء أو أي موجة كهربائية تبدو فعلاً أنها تنتشر بالسرعة c/n خلال وسط قرينة انكساره n ، ولكن تظل الحقول مولـّدة من قبل حركات كل الشحنات ، بما في ذلك الشحنات المتحركة داخل الوسط ، وتظل هـذه المساهمات الأساسية ، التي يتألف منهـا الحقل ، متحركة بالسرعة القصوى c . والمسألة هي أن نفهم كيف تحدث هذه السرعة الأبطأ ظاهرياً .

سنسعى لأن نفهم هذا الأثر في حالة بسيطة جداً . يوضع منبع نسميه « المنبع الخارجي » على بعدٍ كبير من صفيحة رقيقة مصنوعة من مادة شفافة كالزجاج مثلاً . لنبحث عن الحقل على بعدٍ كبير في الجانب الآخر من الصفيحة . وقد مُثّلت هذه الحالة بالمخطط المبين في الشكل (٣١ – ١) ، حيث يفترض




الشكل (٣١ – ١)
transparent material
أمواج كهربائية مارة من خلال طبقة مؤلفة من مادة شفافة

أن S و P يقعان على بعدٍ كبير جداً من الصفيحة . فوفقاً للمبادىء التي ذكرناها من قبل ، يتألف الحقل الكهربائي في أي موضعٍ بعيدٍ عن كل الشحنات المتحركة من المجموع ( المتّجه ) للحقول التي يولدهـا المنبع الخارجي ( عند S ) و الحقول التي تولدها كل شحنة من الشحنات في الصفيحة الزجاجية ، كل منهـا بتأخره الخاص به بالسرعة c . تذكـّر أن إسهام كل شحنة لا يتغير بوجود

الشحنات الأخرى . تلك هي مبادئنا الأساسية . ويمكن كتابة الحقل عند النقطة P كما يلي :

$$\mathbf{E} = \sum_{\text{لكل شحنة كل الشحنات}} \mathbf{E} \qquad (31-1)$$

أو :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \sum_{\text{لكل شحنة كل الشحنات الاخرى}} \mathbf{E} \qquad (31-2)$$

حيث يدل $\mathbf{E}_s$ على الحقل العائد للمنبع وحده وهو ما كان يكون عليه الحقل عند P لو لم تكن هناك أية مادة . ونتوقع أن يكون الحقل عند P مختلفاً عن $\mathbf{E}_s$ إذا لم تكن هناك أية شحنات أخرى متحركة .

لماذا ينبغي أن تكون هناك شحنات متحركة في الزجاج ؟ إننا نعرف أن كل المواد تتكون من ذرات تحتوي على إلكترونات . وعندما يؤثر الحقل الكهربائي للمنبع على هذه الذرات ، يجعل الالكترونات تهتز لأنه يفعل بقوة على الالكترونات وتولّد الالكترونات المتحركة حقلاً، فتؤلف بذلك مشعات جديدة . وهذه المشعات الجديدة مرتبطة بالمنبع S ، لأن حقل هذا المنبع هو الذي يحرّكها . فالحقل الكلي لا يتألف إذن من حقل المنبع S وحده ، بل إنه يُعدّل بالإسهام الاضافي من قبل الشحنات الأخرى المتحركة . وهذا يعني أن الحقل لا يساوي الحقل الذي كان قائماً قبل أن توجد الصفيحة الزجاجية ، بل إنه عُدّل ، وكان التعديل بحيث أصبح الحقل داخل الزجاج يبدو متحركاً بسرعة مختلفة . وهذه هي الفكرة التي نبغي أن ندرسها دراسة كمية .

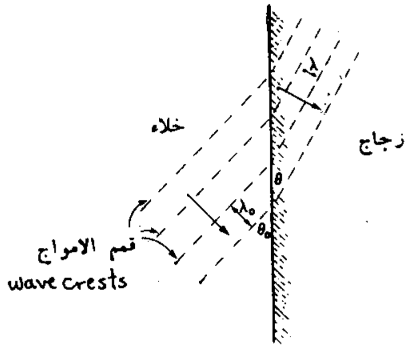
إن هذا معقد إلى حد ما إذا نشدنا الحل الدقيق ، لأنه بالرغم من أننا قلنا أن كل الشحنات المتحركة الأخرى يحركها حقل المنبع ، فإن هذا ليس صحيحاً كل الصحة . فإذا نحن فكرنا بشحنة ما معينة ، فإنها لا تحس بالمنبع وحده ،

بل إنها كأي شيء آخر في العالم ، تحس بكل الشحنات التي تتحرك . وهي تحس ، بوجه خاص ، بالشحنات المتحركة في موضع آخر من الزجاج . وعليه فإن الحقل الكلي الذي يؤثر على شحنة ما معينة يتألف من الحقول التي تولدها الشحنات الأخرى ، التي تتوقف حركاتها على ما تقوم به هذه الشحنة المعينة ! ويمكنك أن ترى أن الأمر يتطلب مجموعة معقدة من المعادلات للحصول على الصيغة الكاملة والصحيحة . وهي على درجة من التعقيد تجعلنا نؤجل المسألة حتى العام القادم .

وبدلاً من ذلك ، ندرس حالة بسيطة جداً كي نفهم كل المبادىء الفيزيائية فهماً واضحاً جداً . نأخذ حالة تكون فيها الآثار من الذرات الأخرى صغيرة جداً بالنسبة إلى الآثار من المنبع . وبعبارة أخرى ، نأخذ مادة لا يكون فيها الحقل الكلي معدّلاً تعديلاً كبيراً بحركة الشحنات الأخرى . وهذا يقابل مادة قرينة انكسارها قريبة جداً من الواحد ، وهو ما يحدث عندما تكون كثافة الذرات مثلاً منخفضة انخفاضاً كبيراً . وتصح حساباتنا من أجل أي حالة تكون فيها قرينة الانكسار قريبة جداً من الواحد لأي سبب من الأسباب . وبهذه الطريقة نتجنب تعقيدات الحل الأعم والأكمل .

هذا وينبغي أن تلاحظ ، بالمناسبة ، أن هناك أثراً آخر تسببه حركة الشحنات في الصفيحة . فهذه الشحنات تشع أيضاً موجات ترجع باتجاه المنبع S . وهذا الحقل الراجع هو الضوء الذي نراه منعكساً على سطوح المواد الشفافة . وهو لا يصدر من السطح تماماً . فالاشعاع الراجع يصدر من كل مكان داخل المادة ، ولكن يتبين أن الأثر الكلي مكافىء لانعكاس على السطوح . إن آثار الانعكاس هذه تخرج عن تقريبنا في الوقت الحاضر لأننا سوف نقتصر على الحساب من أجل مادة قرينتها قريبة من الواحد قرباً يجعل الضوء المنعكس قليلاً جداً .

قبل أن نمضي في دراستنا عن منشأ قرينة الانكسار ، ينبغي أن نفهم أن كل ما نتطلبه لفهم الانكسار هو أن نفهم سبب اختلاف السرعة الظاهرية الموجة في المواد المختلفة . إن انعطاف أشعة الضوء إنما يحدث لان السرعة الفعالة للأمواج تختلف باختلاف المواد . ولكي نذكرك بكيفية حدوث ذلك ، رسمنا في الشكل (٣١ – ٢) بضع قمم متعاقبة لموجة كهربائية ترد من الخلاء على سطح كتلة من الزجاج . ويشير السهم العمودي على قمم الأمواج إلى اتجاه سير الموجة . وينبغي أن يكون لكل الاهتزازات في الموجة التواتر نفسه .




الشكل (٣١ – ٢)

العلاقة بين الانكسار وتغير السرعة

( لقد رأينا أن للاهتزازات المسيَّرة تواتر المنبع المسيِّر نفسه ) . وهذا يعني أيضاً أن قمم الموجة من أجل الأمواج التي على جانبيْ السطح ينبغي أن تكون لها المسافة الفاصلة نفسها على امتداد السطح ، لأنه ينبغي أن تسير معاً ، بحيث أن الشحنة الواقعة على الحد الفاصل تحس بتواتر واحد فقط . ولكن أقصر مسافة بين قمتين من قمم الموجة تساوي طول الموجة الذي يساوي السرعة مقسومة على التواتر . ففي جانب الخلاء ، يكون طول الموجة $\lambda_0 = 2\pi c/\omega$ ، وفي الجانب الآخر يكون $\lambda = 2\pi v/\omega$ أو $\lambda = 2\pi c/\omega n$ ، فيما إذا كانت

$v = c/n$ هي سرعة الموجة . ويمكننا أن نرى من الشكل أن الطريقة الوحيدة لكي « تتلاءم » الأمواج عند الحد الفاصل على نحو صحيح هي أن تنتشر الأمواج في المادة بزاوية مختلفة بالنسبة للسطح . ويمكنك أن ترى من هندسة الشكل أنه من أجل « التلاؤم » ينبغي أن يكون لدينا $\lambda_0/\sin\theta_0 = \lambda/\sin\theta$ ، أو $\sin\theta_0/\sin\theta = n$ ، وهو قانون سنيل . وسوف لا ننظر ، فيما تبقى من مناقشتنا ، إلا في سبب أن للضوء سرعة فعالة تساوي $c/n$ في مادة قرينتها n ، ولن نهتم بعد الآن في هذا الفصل بانعطاف منحى انتشار الضوء .

---

نعود الآن إلى الحالة المبينة في الشكل (٣١ – ١) فنرى أن ما علينا القيام به هو حساب الحقل الذي تولده في P كل الشحنات المهتزة في الصفيحة الزجاجية . نسمي هذا الجزء من الحقل $\mathbf{E}_a$ ، وهو تماماً المجموع المكتوب كالحد الثاني في المعادلة (2 – 31) . وعندما نضيفه إلى الحد $\mathbf{E}_s$ العائد للمنبع ، نحصل على الحقل الكلي عند P .

ولعل هذا هو أعقد شيء نقوم به هذه السنة ، ولكنه معقد فقط لأن هناك أجزاء عديدة ينبغي وضعها معاً ؛ في حين أن كل جزء بسيط جـــداً . وعلى النقيض من الاشتقاقات الأخرى حيث نقول : « انس الاشتقاق ، وانظر إلى الجواب فقط ! » ، فإننا في هذه الحالة لا نحتاج إلى الجواب مثل حاجتنا إلى الاشتقاق . وبعبارة أخرى ، إن الأمر الذي ينبغي أن نفهمه الآن هو الآلية الفيزيائية لتكوين القرينة .

ولكي نرى إلى أين نحن ماضون ، لنبدأ بإيجاد ما ينبغي أن يكون « حقل التصحيح » $\mathbf{E}_a$ فيما إذا كان الحقل الكلي عند P سيبدو كإشعاع من المنبع تباطأ سيره وهو يمر من خلال الصفيحة الرقيقة . فإذا لم يكن للصفيحة

أي تأثير عليه ، فإن حقل موجةٍ تنتشر نحو اليمين ( وفق المحور z ) يساوي :

$$E_s = E_0 \cos \omega\, (t - z/c) \qquad (31\text{-}3)$$

أو باستعمال الرمز الأسي :

$$E_s = E_0\, e^{i\omega\,(t - z/c)} \qquad (31\text{-}4)$$

والآن ماذا يمكن أن يحدث إذا انتشرت الموجة انتشاراً أبطأ في مرورها من خلال الصفيحة ؟ لنسم ثخن الصفيحة $\Delta z$ . فإذا لم تكن الصفيحة موجودة ، فإن الموجة تقطع المسافة $\Delta z$ في خلال الزمن $\Delta z/c$ . ولكن إذا ظهر أنها تنتشر بالسرعة $c/n$ ، فإنه ينبغي أن تستغرق زمناً اطول يساوي $n\Delta z/c$ او زمناً إضافياً يساوي $\Delta t = (n-1)\,\Delta z/c$ . وتتابع الموجة بعد ذلك انتشارها بالسرعة c مرة اخرى . ويمكن ان نأخذ بعين الاعتبار التأخر الإضافي نتيجة للمرور من خلال الصفيحة بأن نضع مكان t في المعادلة (4 - 31) المقدار $(t - \Delta t)$ او $[t - (n-1)\Delta z/c]$ . وعليه فإنه ينبغي كتابة الموجة بعد إدخال الصفيحة كما يلي :

$$\underset{\substack{\text{بعد الصفيحة}\\ \text{after plate}}}{E} = E_0\, e^{i\omega\,[\,t - (n-1)\,\Delta z/c - z/c\,]} \qquad (31\text{-}5)$$

ويمكننا كذلك أن نكتب هذه المعادلة كما يلي :

$$\underset{\text{بعد الصفيحة}}{E} = e^{-i\omega\,(n-1)\,\Delta z/c}\; E_0\, e^{i\omega\,(t - z/c)} \qquad (31\text{-}6)$$

وتنص هذه المعادلة على أنه يتم الحصول على الموجة ، بعد الصفيحة ، من الموجة التي يمكن ان يكون لها وجود بدون الصفيحة ، اي من $E_s$ ، وذلك بالضرب بالعامل $e^{-i\omega\,(n-1)\,\Delta z/c}$ . ونحن نعلم أن ضرب تابع مهتز كالتابع $e^{i\omega t}$

بعامل $e^{i\theta}$ ، إنما يعني أننا نغير طور الاهتزازة بالزاوية $\theta$ ، وهو طبعاً ما قام به التأخر الإضافي نتيجة للمرور من خلال الثخن $\Delta z$ . فقد أخر الطور بالمقدار $\omega (n-1) \Delta z/c$ ( ونقول أخّر ، بسبب الإشارة السالبة للأس ) .

لقد قلنا من قبل انه ينبغي على الصفيحة أن تُضيف حقلاً $E_a$ إلى الحقل الأصلي $E_s = E_0 e^{i\omega(t-z/c)}$ ، ولكننا وجدنا بدلاً من ذلك أن أثر الصفيحة هو أن يُضرب الحقل بعامل يغيّر طوره . ومع ذلك ، فهذا الأمر صحيح حقاً لأنه يمكننا أن نحصل على النتيجة نفسها بإضافة عدد عقدي مناسب . وواضح أن من السهل إيجاد العدد المناسب الذي ينبغي إضافته في حالة كون المقدار $\Delta z$ صغيراً ، إذ أنك تذكر أنه عندما يكون $x$ عدداً صغيراً فإن $e^x$ يكون مساوياً $(1+x)$ تقريباً . وعليه فإنه يمكننا أن نكتب :

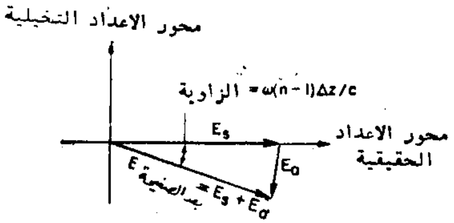
$$e^{-i\omega(n-1)\Delta z/c} = 1 - i\omega(n-1)\Delta z/c \qquad (31-7)$$

وباستعمال هذه المساواة في المعادلة ( 31 — 6 ) نجد :

$$\underset{\text{بعد الصفيحة}}{E} = \underbrace{E_0 e^{i\omega(t-z/c)}}_{E_s} \underbrace{- \frac{i\omega(n-1)\Delta z}{c} E_0 e^{i\omega(t-z/c)}}_{E_a} \qquad (31-8)$$

وليس الحد الأول إلا الحقل العائد للمنبع ، وأما الحد الثاني فينبغي أن يساوي $E_a$ تماماً ، وهو الحقل الذي تولده ، على يمين الصفيحة ، الشحنات المهتزة فيها ، وقد عُبّر عنه هنا بدلالة قرينة الانكسار $n$ ، وهو يتوقف طبعاً على شدة الموجة الصادرة من المنبع .

إن ما كنا نقوم به يمكن تصوُّره بسهولة إذا ما نظرنا إلى مخطط العدد العقدي في الشكل (٣١ — ٣) . نرسم أولاً العدد $E_s$ ( نختار قيمتين معينتين للمقدارين z و t تجعلان $E_s$ أفقياً ، ولكن هذا ليس ضرورياً ) . إن التأخر العائد إلى الإبطاء في الصفيحة يؤخر طور هذا العدد ، أي أنه يُدير $E_s$ بزاوية سالبة . ولكن هذا مكافىء لإضافة المتجهـة الصغيرة $E_a$ المتعامدة مع $E_s$ على وجه التقريب . ولكن ليس هذا إلا ما يعنيه العامل (— i) في الحد الثاني من المعادلة (8 — 31) . فهو يعني أنه إذا كان $E_s$ حقيقياً ، فإن $E_a$ يكون وهمياً وسالباً أو أن $E_s$ و $E_a$ يصنعان بوجه عام زاوية قائمة .




الشكل (٣١ - ٣)

مخطط الموجة النافذة من أجل قيمتين معينتين لـ t و z

## ٣١ — ٢ : الحقل الناتج عن المادة *The field due to the material*

علينا الآن أن نسأل : هل الحقل $E_a$ الذي نحصل عليه من الحد الثاني في المعادلة (8 — 31) من النوع الذي نتوقعه من الشحنات المهتزة في الصفيحة ؟ إذا كنا نستطيع أن نثبت أن الأمر كذلك ، فإننا نكون بذلك قد حسبنا ما ينبغي أن تكون عليه القرينة n ! [ ذلك لأن n هو العدد الوحيد غير الأساسي في المعادلة (8 — 31) ] . ننتقل الآن إلى حساب الحقل $E_a$ الذي تولده

شحنات المادة . ( ولكي نساعدك في تتبع الرموز العديدة التي استعملناها حتى الآن ، والتي سنستعملها فيما تبقى من حسابنا ، وضعنا هذه الرموز كلها معاً في الجدول (٣١ – ١) .

## الجدول ( ٣١ ــ ١ )

## الرموز المستعملة في الحسابات

$E_s$ = الحقل الذي يولده المنبع . field from the source

$F_a$ = الحقل الذي تولده الشحنات في الصفيحة .

$\Delta z$ = ثخن الصفيحة . thickness of the plate

$z$ = البعد العمودي عن الصفيحة .

$n$ = قرينة الانكسار .

$\omega$ = التواتر ( الزاوي ) للإشعاع . frequency (angular) of the radiation

$N$ = عدد الشحنات في وحدة الحجم من الصفيحة .

$\eta$ = عدد الشحنات في وحدة المساحة من الصفيحة .

$q_e$ = شحنة الالكترون .

$m$ = كتلة الالكترون .

$\omega_0$ = التواتر المجاوب لالكترون مقيد في ذرة . resonant frequency of an electron bound in an atom

إذا كان المنبع S في الشكل (٣١ – ١) بعيداً جداً إلى اليسار ، فإنه يكون للحقل $E_s$ الطور نفسه في أي موضع على الصفيحة ، وعلى ذلك ، يمكننا أن نكتب أن الحقل في جوار الصفيحة يساوي :

$$E_s = E_0\, e^{i(\omega t - z/c)} \qquad (31-9)$$

وعلى الصفيحة نفسها ، حيث $z = 0$ ، يكون لدينا :

$$( \text{على الصفيحة} )\ E_s = E_0 e^{i\omega t} \qquad (31-10)$$

إن كل الكترون من الالكترونات في ذرات الصفيحة يحس بهذا الحقل الكهربائي ، فيهتز إلى الأعلى وإلى الأسفل ( نفترض أن منحى $E_0$ شاقولي ) بفعل القوة الكهربائية $qE$ . ولإيجاد الحركة التي نتوقع أن تقوم بها الالكترونات ، نفترض أن الذرات هزازات صغيرة ، أي أن الالكترونات مرتبطة بالذرات ارتباطاً مرناً ، وهذا يعني أنه إذا أثرت قوة ما على إلكترون فإن ابتعاده عن وضعه النظامي يتناسب مع تلك القوة .

وقد تظن أن هذا نموذج غريب للذرة إذا كنت قد سمعت عن دوران الالكترونات في محارك . ولكن ليست هـذه إلا صورة مفرطة في البساطة . والصورة الصحيحة للذرة التي تقدمهـا نظرية الميكانيك الموجي تقول : إنه ما دام الأمر يتعلق بقضايا يدخل فيها الضوء ، فإن الالكترونات تسلك كما لو أنها كانت مربوطة بنوابض . وعلى هذا ، سوف نفترض أن للالكترونات قوة خطية معيدة تعمل مع كتلتها $m$ على أن تجعلهـا تسلك سلوك الهزازات الصغيرة بتواتر مجاوب $\omega_0$ . وقد سبق أن درسنا مثل هـذه الهزازات ، ونعلم أن معادلة حركتها تكتب على النحو التالي :

$$m\left(\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x\right) = F \qquad (31-11)$$

حيث $F$ هي القوة المحركة .

وفي مسألتنا هذه ، تنجم القوة المحركة عن الحقل الكهربائي للموجة الصادرة من المنبع ، فعلينا إذن أن نستعمل :

$$F = q_e E_s = q_e E_0 e^{i\omega t} \qquad (31-12)$$

حيث $q_e$ : الشحنة الكهربائية على الالكترون . وحيث استعملنا عوضاً عن $E_s$ العلاقة $E_s = E_0 e^{i\omega t}$ من المعـادلة (31—10) . وعليه فإن معادلة حركة الالكترون تصبح كما يلي :

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x\right) = q_e E_0 e^{i\omega t} \qquad (31 - 13)$$

وقد حللّنا هذه المعادلة من قبل ، ونعرف أن الحل هو ما يلي :

$$x = x_0 e^{i\omega t} \qquad (31-14)$$

وبالتعويض في العلاقة (31—13) نجد أن :

$$x_0 = \frac{q_e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \qquad (31-15)$$

بحيث يكون :

$$x = \frac{q_e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} e^{i\omega t} \qquad (31-16)$$

وقد حصلنا على ما كنا نحتاج إلى معرفته وهو حركة الالكترونات في الصفيحة . وهي حركة واحدة بالنسبة لكل الالكترونات ، باستثناء أن الوضع الوسطي ؛ أي « صفر » الحركة ؛ يختلف طبعاً من إلكترون لآخر .

ونحن الآن مهيئون لإيجاد الحقل $E_a$ الذي تولده الذرات عند النقطة P ، لأننا استخرجنا من قبل ( في نهاية الفصل الثلاثين ) قيمة الحقل الذي تولده وريقة من الشحنات التي تتحرك كلهـا معاً . فإذا عدنا إلى المعـادلة (19 — 30) فإننا نرى أن الحقل $E_a$ عند النقطة P ما هو إلا جداء ثابتة سالبة في سرعة الشحنات المتأخرة بزمن مقداره z/c . وبمفاضلة x في المعـادلة (31—16) للحصول على

السرعة وإدخال التأخر فيها ؛ أو بوضع $x_0$ من العلاقة (31—15) في العلاقة (30—18) ؛ نحصل على :

$$E_a = -\frac{nq_e}{2\varepsilon_0 c}\left[i\omega \frac{q_e E_0}{m(\omega_0^2-\omega^2)} e^{i\omega(t-z/c)}\right] \quad (31-17)$$

وهو تماماً ما كنا نتوقعه ، فالحركة الناتجة للالكترونات ولّدت موجة إضافية ، وهذه الموجة تنتشر نحو اليمين ، وهو ما يدل عليه العامل $e^{i\omega(t-z/c)}$ ، وسعة هذه الموجة متناسبة مع عدد الذرات في وحدة السطح من الصفيحة ، ( أي مع العامل $\eta$ ) ، ومتناسبة أيضاً مع شدة حقل المنبع (أي مع العامل $E_0$ ) و كما ينبغي أن نتوقع ، هناك كذلك بعض العوامل التي تتوقف على الخواص الذرية ( $q_e$ و m و $\omega_0$ ) .

ولكن أهم الأمور هو أن هذه الصيغة (31 - 17) للحقل $E_a$ تبدو مشابهة إلى حد كبير لعبارة الحقل $E_a$ التي حصلنا عليها في المعادلة (31 - 8) بقولنا إن الموجة الأصلية تأخرت نتيجة لمرورها من خلال مادة قرينة انكسارها n . وفي الواقع ، تصبح العبارتان متطابقتين فيما إذا تحقق ما يلي :

$$(n-1)\,\Delta z = \frac{\eta\, q_e^2}{2\varepsilon_0\, m(\omega_0^2-\omega^2)} \qquad (31-18)$$

لاحظ أن كلا الطرفين يتناسبان مع $\Delta z$ ، ذلك لأن $\eta$ ، وهو عدد الذرات في وحدة المساحة ، يساوي $N\,\Delta z$ ، حيث N هو عدد الذرات في وحدة الحجم من الصفيحة . وبالتعويض عن $\eta$ بـ $N\,\Delta z$ ، وحذف $\Delta z$ نحصل على نتيجتنا الرئيسية ، وهي صيغة قرينة الانكسار بدلالة خواص ذرات المادة ، وبدلالة تواتر الضوء :

$$n = 1 + \frac{N q_e^2}{2\varepsilon_0 m(\omega_0^2-\omega^2)} \qquad (31-19)$$

وهذه المعادلة تزودنا « بتفسير » قرينة الانكسار الذي كنا نود الحصول عليه .

### ٣١ — ٣ : التبدد Dispersion

لاحظ أننا حصلنا بالعملية السابقة على شيء ذي شأن كبير . ذلك لأننا لم نحصل فقط على عدد لقرينة الانكسار يمكن حسابه بدءاً من المقادير الذرية الأساسية ، بل إننا تعلمنا أيضاً كيف ينبغي أن تتغير قرينة الانكسار بتغير تواتر الضوء $\omega$ . وهذا أمر ما كنا لنفهمه إطلاقاً من النص البسيط القائل إن « الضوء ينتشر بسرعة أبطأ في المادة الشفافة » . ولا شك في أنه لا زالت لدينا مسألة معرفة عدد الذرات في وحدة الحجم وتواترها الطبيعي $\omega_0$ . إننا لا نعرف هذا حتى الآن ، لأنه يختلف من مادة لأخرى ، وليس باستطاعتنا الآن الحصول على نظرية عامة في هذا الشأن . فصياغة نظرية عامة في خواص المواد المختلفة ، أي تواتراتها الطبيعية وما إلى ذلك ، ليس ممكناً إلا بالاعتماد على الميكانيك الكوانتي الذري . كذلك فإن للمواد المختلفة خواص مختلفة وقرائن مختلفة ، وعليه فإننا لا نستطيع أن نتوقع ، على كل حال ، أن نحصل على صيغة عامة للقرينة تصلح لكل المواد .

ومع ذلك ، سوف نناقش الصيغة التي حصلنا عليها ، وذلك في ظروف مختلفة وممكنة . فأولاً ، من أجل معظم الغازات العادية ( كالهواء مثلاً ، ومعظم الغازات عديمة اللون ، والهدروجين والهليوم وما إلى ذلك ) تقابل التواترات الطبيعية للهزازات الالكترونية ضوءً ما فوق البنفسجي . وهذه التواترات أكبر من تواترات الضوء المرئي ، أي أن $\omega_0$ أكبر كثيراً من $\omega$ للضوء المرئي ، ويمكننا ، بتقريب أول ، إهمال $\omega^2$ بالنسبة إلى $\omega_0^2$ . وهكذا نجد أن القرينة ثابتة على وجه التقريب . وعليه فإن القرينة ثابتة تقريباً في حالة الغازات .

وهذا الأمر صحيح أيضاً من أجل معظم المواد الشفافة الأخرى كالزجاج . وإذا دققنا النظر في عبارتنا أكثر قليلاً فإننا نلاحظ أنه عندما ترتفع قيمة $\omega$ ، يصغر المخرج ، وترتفع قيمة القرينة أيضاً . وعليه فإن n تزداد قليلاً مع التواتر . فالقرينة في حالة الضوء الأزرق أكبر منها في حالة الضوء الأحمر . وهذا هو السبب في أن الموشور يحرف الضوء في منطقة الأزرق أكثر من حرفه له في منطقة الاحمر .

ويطلق على ظاهرة توقف القرينة على التواتر اسم ظاهرة التبدد ، لانها هي الاساس في أن الضوء « يتبدد » بالموشور إلى طيف . وتسمى معادلة قرينة الانكسار بدلالة التواتر ، معادلة التبدد . وهكذا حصلنا على معادلة التبدد . ( تلاقي « معادلات التبدد » في السنين القليلة الاخيرة استعمالاً جديداً في نظرية الجسيمات العنصرية ) .

إن معادلة التبدد توحي بآثار هامة أخرى . فإذا كان لدينا تواتر طبيعي $\omega_0$ واقع في منطقة الضوء المرئي ، أو إذا قسنا قرينة الانكسار لمادة كالزجاج في منطقة ما فوق البنفسجي ، حيث يقترب $\omega$ من $\omega_0$ ، فإننا نرى أنه يمكن للقرينة أن تكبر كبراً مفرطاً في حالة التواترات القريبة جداً من التواتر الطبيعي ، ذلك لأنه يمكن للمخرج أن يقترب من الصفر . افترض بعد هذا أن $\omega$ أكبر من $\omega_0$ . ويمكن أن يحدث هذا مثلاً إذا أخذنا مادة كالزجاج وأسقطنا عليها أشعة سينية . وفي الحقيقة ، بما أن بعض المواد ، العاتمة في الضوء المرئي كالغرافيت مثلاً ، تكون شفافة في الاشعة السينية ، فإنه يمكننا أيضاً أن نتحدث عن قرينة انكسار الفحم بالنسبة للأشعة السينية . إن كل التواترات الطبيعية لذرات الفحم أقل كثيراً من التواتر الذي نستعمله في الاشعة السينية ، نظراً لان تواتر الاشعة السينية عالٍ جداً . فقرينة الانكسار هي

القرينة التي تعطيها معادلة التبدد إذا جعلنا $\omega_0$ مساوية الصفر ( أي بإهمال $\omega_0^2$ بالنسبة إلى $\omega^2$ ) .

وتحدث حالة مماثلة اذا أسقطنا أمواجاً راديوية ( أو ضوءاً ) على غاز من الكترونات حرة ، وفي الطبقات العليا من الجو تُحرر الالكترونات من ذراتها بفعل الضوء فوق البنفسجي الصادر من الشمس وتتوضع هناك كالكترونات حرة. فمن أجل الالكترونات الحرة يكون $\omega_0 = 0$ ( أي ليست هناك قوة معيدة مرنة ) . إن وضع $\omega_0 = 0$ في معادلة التبدد يعطي الصيغة الصحيحة لقرينة الانكسار من أجل الامواج الراديوية في الطبقات الجوية العليا ، حيث يمثل N الآن كثافة الالكترونات الحرة ( أي عددها في وحدة الحجم ) في الطبقات الجوية العليا . ولكن لنلق نظرة أخرى على المعادلة ، إنه إذا أسقطنا أشعة سينية على المادة ، أو أشعة راديوية ( أو أية أمواج كهربائية ) على إلكترونات حرة ، فإن الحد $(\omega_0^2 - \omega^2)$ يصبح سالباً ، وينتج من ذلك أن n أقل من الواحد . وهذا يعني أن السرعة الفعالة للأمواج في المادة أكبر من c ! فهل يمكن أن يكون ذلك صحيحاً ؟

إنه لصحيح . فبالرغم من القول بأنه ليس في استطاعتك أن ترسل إشارات بسرعة أكبر من سرعة الضوء ، فالصحيح ، مع ذلك ، هو أن قرائن انكسار المواد عند تواتر معين يمكن أن تكون أكبر من الواحد أو أقل منه . وهذا لا يعني سوى أن إزاحة الطور التي يحدثها الضوء المتبعثر يمكن أن تكون موجبة أو سالبة . وعلى كل يمكن إثبات أن السرعة التي يمكنك أن ترسل بها إشارةً ما لا تتعين بالقرينة عند تواتر واحد معين ، بل تتوقف على قيمة القرينة عند تواترات عديدة . إن ما تطلعنا عليه القرينة هو السرعة التي تنتشر بها عُقد الموجة ( أو قممها ) . إن عقدة موجةٍ ما ليست إشارةً في حد ذاتها .

وفي موجة كاملة ليست فيها تكييفات من أي نوع كان ، أي موجة ذات اهتزاز ثابت ، ليس في استطاعتك حقاً أن تقول متى « بدأت » ، وعلى هذا لا يمكنك استعمالها كإشارة توقيت . فلكي ترسل إشارة لا بد لك من تغيير الموجة على نحوٍ ما ، بأن تحدث فيها حزاً ، أو أن تجعلها أرق قليلاً أو أغلظ قليلاً . وهذا يعني أنه ينبغي أن يكون لدينا أكثر من تواتر واحد في الموجة ، ويمكن البرهان على أن سرعة انتشار الاشارات لا تتعلق بقرينة الانكسار فحسب بل إنها تتبع أيضاً كيفية تغير قرينة الانكسار مع التواتر . وينبغي أن نرجىء هذا الموضوع أيضاً ( حتى الفصل الثامن والأربعين ) . وسوف نحسب لك حينئذ السرعة الفعلية للاشارات عبر مثل تلك القطعة الزجاجية ، وسترى أنها ليست أكبر من سرعة الضوء ، بالرغم من أن العقد ، التي هي نقط رياضية ، تنتشر فعلاً بسرعة أكبر من سرعة الضوء .

ولاعطاء تلميح بسيط عن كيفية حدوث ذلك ليس إلا ، لك ان تلاحظ ان العقبة الحقيقية تتعلق بكون تجاوبات الشحنات معاكسة للحقل ، أي أن الاشارة أصبحت معكوسة . لذلك ففي معادلتنا للمقدار $x$ أي المعادلة (31-16) نجد أن انزياح الشحنة يتم في الاتجاه المعاكس للحقل المؤثر ، لأن $(\omega_0^2-\omega^2)$ سالب حينما يكون $\omega_0$ صغيراً . فالصيغة تنص على أنه عندما يشد الحقل الكهربائي شاداً في اتجاهٍ ما ، فإن الشحنة تتحرك في الاتجاه المعاكس .

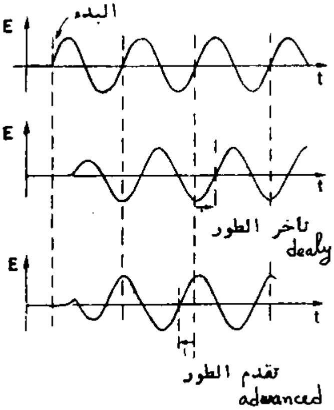
ولكن كيف اتفق أن تكون حركة الشحنة في الاتجاه المعاكس؟ إنها بلا ريب لا تبدأ حركتها في الاتجاه المعاكس عندما يبدأ تطبيق الحقل . إنه عندما تبدأ الحركة أولاً يكون هناك أثر انتقالي ، يستقر بعد فترة وجيزة ، وحينئذ فقط يكون طور اهتزازة الشحنة معاكساً للحقل المؤثر . وعندئذ يمكن أن يظهر طور الحقل النافذ متقدماً بالنسبة لموجة المنبع . إن هذا التقدم في الطور هو الذي نعنيه عندما نقول إن « سرعة الطور » أو سرعة العقد أكبر من $c$ .

ونقدم في الشكل (٣١ – ٤) فكرة تخطيطية تبين كيف يمكن أن تبدو الأمواج في الحالة التي تُشغّل فيها الموجة فجأة ( لاعطاء إشارة ) . وترى من المخطط أن الاشارة ( أي بداية الموجة ) لا تكون السباقة في حالة الموجة التي ينتهي الأمر بها إلى أن تصبح متقدمة في الطور .

( أ ) الموجة دون وجود مادة

(ب) الموجة النافذة عندما تكون $n > 1$

(ح) الموجة النافذة عندما تكون $n < 1$



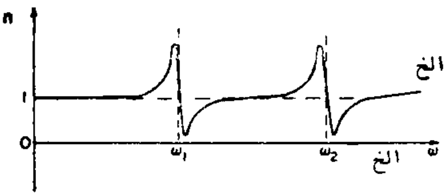

الشكل (٣١–٤)
« إشارات » موجية
signals

لننظر الآن مرة أخرى في معادلتنا معادلة التبدد . ينبغي أن نشير إلى أن تحليلنا لقرينة الانكسار يعطي نتيجة هي أبسط بعض الشيء مما يمكن أن نلاقيه فعلاً في الطبيعة . ولكي نكون دقيقين تماماً ، ينبغي علينا أن نضيف بعض التحسينات . فأولاً ، علينا أن نتوقع أن نموذجنا للهزازة الذرية ينبغي أن تكون لها قوة مخمِّدة ما ( وإلا فإنها ما أن تهتز حتى تستمر في اهتزازها إلى الأبد ، ونحن لا نتوقع أن يحدث ذلك ) . لقد استخرجنا من قبل المعادلة (8–23) التي تمثل حركة هزازة متخامدة ، والنتيجة هي أن المخرج في المعادلة (16 — 31) وبالتالي في المعادلة (19 — 31) يتغير من $(\omega_0^2 - \omega^2)$ إلى $(\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega)$ ، حيث يدل $\gamma$ على عامل التخامد .

ونحتاج إلى تعديل ثان كي نأخذ بعين الاعتبار أن هناك تواترات مجاوبة عديدة لكل نوع معين من الذرات . ومن السهل تنظيم معادلة التبدد بتصورنا أن هناك عدة أنواع مختلفة من الهزازات ، و لكن كل هزازة تعمل على حدة ، وعلى هذا ما علينا إلا أن نجمع إسهامات كل الهزازات . لنقل إن هناك $N_k$ إلكترونا في وحدة الحجم تواترها الطبيعي $\omega_k$ وعامل تخامدهـا $\gamma_k$ . فيكون لدينا إذن من أجل معادلة التبدد :

$$n = 1 + \frac{q_e^2}{2\varepsilon_0 m} \sum_k \frac{N_k}{\omega_k^2 - \omega^2 + i\gamma_k \omega} \qquad (31-20)$$

فلدينا أخيراً عبارة كاملة تصف قرينة الانكسار التي تلاحظ في مواد عديدة* . إن القرينة المعبر عنها بهذه الصيغة تتغير مع التواتر على نحو قريب من المنحني المبين في الشكل (٣١ - ٥) .




الشكل ( ٣١- ٥ )
قرينة الانكسار كتابع للتواتر

---

* وفي الحقيقة ، بالرغم من أن المعادلة (20 – 31) تظل صحيحة في الميكانيك الكوانتي ، فان تفسيرها يختلف بعض الشيء . ففي الميكانيك الكوانتي ، حتى الذرة ذات الالكترون الواحد كالهدروجين ، تكون لها عدة تواترات مجاوبة . وعليه فان $N_k$ لا تدل في الحقيقة على عدد الالكترونات ذات التواتر $\omega_k$، بل انه يحل مكانها $Nf_k$، حيث يدل $N$ على عدد الذرات في وحدة الحجم ويدل $f_k$ « المسمى شدة الهزازة » على عامل يبين بأية شدة تُظهر الذرة كلاً من تواتراتها المجاوبة $\omega_k$ .

وإنك لتلاحظ أنه ما دام ω غير قريب جداً من احد التواترات المجاوبة ، فان ميل المنحني يكون موجباً . ومثل هذا الميل الموجب يسمى تبدداً « نظاميا » ( لأنه وضوحاً أكثر الحالات شيوعاً ) . ولكن هناك مجالاً صغيراً من التواترات ω ، قريباً جداً من تواترات التجاوب، يكون من أجله الميل سالباً . ومثل هذا الميل السالب يشار إليه غالباً بأنه « تبدد شاذ » لأنه بدا غير مألوف عندما لوحظ لأول مرة ، قبل أن يعرف أحد أن هناك أشياء كالالكترونات . ولكن كلا الميلين « نظاميان » تماماً في رأينا !

## ٣١ ـــ ٤ : الامتصاص *Absorption*

لعلك لاحظت شيئاً غريباً بعض الغرابة فيما يتعلق بالصيغة الاخيرة ، أي المعادلة ( 20 — 31 ) التي حصلنا عليهـا من أجل معادلة التبدد . فبسبب الحد $i\gamma$ الذي وضعناه فيها كي نأخذ التخامد بعين الاعتبار ، أصبحت قرينة الانكسار عدداً عقدياً ! فماذا يعني ذلك ؟ لدى إيجـــاد الجزءين الحقيقي والوهمي في n يمكننا أن نكتب :

$$n = n' - in'' \qquad (31-21)$$

حيث $n'$ و $n''$ عددان حقيقيان . ( وقد استعملنا الاشارة السالبة قبل $in''$ لأن $n''$ تصبح حينئذ عدداً موجباً ، كما يمكنك أن تثبت ذلك بنفسك ) .

ويمكننا أن نتبين ماذا تعني مثل هذه القرينة العقدية بالرجوع إلى المعـادلة (6 — 31) ، وهي معادلة الموجة بعد أن نفذت من خلال صفيحة قرينة مادتها n . فإذا وضعنا القرينة العقدية n في هذه المعادلة وأجرينا بعض الترتيب ، فإننا نحصل على ما يلي :

$$E = \underbrace{e^{-\omega n'' \Delta z/c}}_{A} \; \underbrace{e^{-i\omega (n'-1) \Delta z/c} \; E_0 \; e^{i\omega (t-z/c)}}_{B} \qquad (31-22)$$

بعد الصفيحة

إن العوامل الأخيرة المشار إليهـا بالحرف B في المعـادلة (22–31) ليست إلا الصيغة التي حصلنا عليها من قبل ، وهي كذلك تصف موجة تأخّر طورُها بالزاوية $\omega (n' - 1) \Delta z/c$ نتيجة لاختراقها المادة . أما الحد الأول A فهو جديد ، وهو عامل أسي أسه حقيقي ، لأنه كان هناك حرفا i قد اختُصر . كذلك فإن الأس سالب ، إذن فالعـامل عدد حقيقي أقل من الواحد . فهو يعبر عن نقصان في قيمة الحقل بمقدار يزداد ، كما ينبغي علينا أن نتوقع ، كلما كبر $\Delta z$ . فالموجه تضعف بانتشارها خلال المادة . والمـادة « تمتص » جزءاً من الموجة . أي أن الموجة تبرز من الجانب الآخر وطاقتها أقل ممـا كانت . وينبغي ألا يدهشنا ذلك ، لأن التخامد الذي عزوناه إلى الهزازات هو في الحقيقة قوة احتكاك أي ينبغي أن نتوقـع أن يؤدي إلى فقدان الطاقـة . وهكذا نرى أن الجزء الوهمي $n''$ في قرينة انكسار عقدية يمثل امتصاصاً ( أو « إضعافـاً » ) للموجة . وفي الواقع ، يشـار أحياناً إلى $n''$ بأنه « قرينة الامتصاص » .

ويمكننا أن نشير أيضاً إلى أن الجزء الوهمي في القرينة n يقابل انعطاف السهم $E_a$ في الشكل (٣١ – ٣) نحو نقطة الأصل . فواضح إذن لماذا ينقص الحقل النافذ حينئذ .

وعادة يكون امتصاص الضوء ضئيلاً جداً ، كما هو الحال في الزجاج مثلاً . وهذا ما ينبغي أن نتوقعــه من معادلتنا (20–31) ، لأن الجزء الوهمي في المخرج ، وهو $i\gamma_k\omega$ أصغر بكثير من الحد $( \omega_k^2 - \omega^2 )$ . ولكن إذا كان تواتر الضوء $\omega$ قريباً جداً من $\omega_k$ ، فإن حد التجاوب $( \omega_k^2 - \omega^2 )$ يمكن أن

يصبح حينئذ صغيراً بالنسبة إلى $i\gamma_k\omega$ ، وتصبح القرينة بكاملها تقريباً وهمية . ويصبح لامتصاص الضوء الأثر السائد . إن هذا الأثر بالذات هو الذي يولد الخطوط المظلمة في طيف الضوء الذي نتلقاه من الشمس . فالضوء الصادر من سطح الشمس مر من خلال جو الشمس ( ومن جو الأرض كذلك ) وتم امتصاص الضوء امتصاصاً شديداً عند التواترات المجاوبة للذرات المكونة لجو الشمس .

إن مشاهدة مثل هذه الخطوط الطيفية في ضوء الشمس تمكّننا من معرفة التواترات المجاوبة للذرات وبالتالي من معرفة التركيب الكيميائي لجو الشمس . والنوع نفسه من المشاهدات يكشف لنا عن المواد المكونة للنجوم . ونعرف من مثل هذه القياسات أن العناصر الكيميائية في الشمس وفي النجوم هي العناصر نفسها التي نجدها على الأرض .

## ٣١ ــ ٥ : الطاقة المحمولة على موجة كهربائية: The energy carried by an electric wave

لقد رأينا أن الجزء التخيلي في القرينة يعني امتصاصاً . وسوف نستفيد الآن من معرفتنا هذه لايجاد مقدار الطاقة التي تحملها موجة ضوئية . لقد ناقشنا من قبل أن الطاقة التي يحملها الضوء تتناسب مع $\overline{E^2}$ ، أي مع المتوسط الزمني لمربع الحقل الكهربائي للموجة . فنقصان E بسبب الامتصاص ينبغي أن يدل على ضياع في الطاقة ، يمكن أن تؤول إلى شيء من الاحتكاك بين الالكترونات ، ويمكن أن نخمن بأنها تتحول أخيراً إلى حرارة في المادة .

وإذا نظرنا في الضوء الواصل إلى وحدة المساحة ، سنتمتر مربع مثلاً ، من صفيحتنا في الشكل (٣١ ــ ١) ، فإنه يمكننا أن نكتب معادلة الطاقة التالية ، ( هذا إذا افترضنا أن الطاقة محفوظة ، وهو ما نفعله ! ) :

(23 – 31) العمل المنجز في الثانية + الطاقة الخارجة في الثانية = الطاقة الواصلة في الثانية

ويمكن أن نكتب عوضاً عن الحد الأول (على اليسار) $\alpha\overline{E_s^2}$ ، حيث $\alpha$ هو ثابت التناسب المجهول حتى الآن ، وهو يربط بين القيمة الوسطية لـ $E^2$ وبين الطاقة المحمولة . وينبغي ، من أجل الحد الثاني ، أن نضمِّن الجزء من الذرات المشعة في المادة ، وعليه ينبغي أن نستعمل $\alpha\overline{(E_s + E_a)^2}$ ، أو بإجراء التربيع : $\alpha(\overline{E_s^2} + 2\overline{E_s E_a} + \overline{E_a^2})$ .

لقد أجرينا كل حساباتنا من أجل طبقة رقيقة من المادة التي لا تختلف قرينتها كثيراً عن الواحد ، بحيث يكون $E_a$ دائماً أصغر كثيراً من $E_s$ ( وما ذلك إلا لجعل الحسابات أيسر ) . وبمراعاة تقريباتنا ، ينبغي إذن أن نهمل الحد $\overline{E_a^2}$ ، لأنه أصغر كثيراً من $\overline{E_s E_a}$ . ولك أن تقول « عليك إذن أن تهمل أيضاً $\overline{E_s E_a}$ ، لأنه هو أيضاً أصغر كثيراً من $\overline{E_s^2}$ » . صحيح أن $\overline{E_s E_a}$ أصغر كثيراً من $\overline{E_s^2}$ ، ولكن ينبغي أن نحتفظ بـ $\overline{E_s E_a}$ وإلا كان تقريبُنا التقريب الذي يصح إذا أهملنا وجود المادة إهمالاً تاماً ! وإحدى الطرق لاختبار سلامة حساباتنا هي أن نرى أننا نحتفظ دائماً بالحدود التي تتناسب مع $N\,\Delta z$ — ، أي كثافة الذرات في المادة ، ولكننا نهمل الحدود التي تتناسب مع $(N\,\Delta z)^2$ أو مع أي قوة أكبر للمقدار $N\,\Delta z$ . وينبغي أن يسمى تقريبنا هذا « تقريب الكثافة المنخفضة » .

وبالروح نفسها ، يمكننا ملاحظة أن معادلة الطاقة أهملت الطاقة في الموجة المنعكسة . ولكن لا بأس في ذلك لأن هذا الحد متناسب أيضاً مع $(N\,\Delta z)^2$ ، لأن سعة الموجة المنعكسة تتناسب مع $N\,\Delta z$ .

ومن أجل الحد الأخير في المعادلة (23– 31) ، نود حساب معدل ما تقوم به الموجة الواردة من عمل على الالكترونات . إننا نعرف أن العمل يساوي جداء

القوة بالمسافة . وعليه فإن معدّل القيام بعمل ( أو ما يسمى ايضاً الاستطاعة ) يساوي جداء القوة بالسرعة . وهو يساوي حقاً $F . V$ ، ولكن ليس لنا ان نهتم بالجداء السلمي عندما يكون للقوة وللسرعة المنحى نفسه ، كما هي الحال هنا ( باستثناء إمكان وجود إشارة سالبة ) . وعليه فإننا نأخذ من أجل كل ذرة $\overline{q_e E_s v}$ كمعدّل وسطي للعمل المنجز . ولما كان هناك $N \Delta z$ ذرة في وحدة المساحة ، فإنه ينبغي كتابة الحد الأخير في المعادلة (23 — 31) بالشكل $N \Delta z\, q_e \overline{E_s v}$ . وتصبح معادلتنا للطاقة كما يلي :

$$\alpha \overline{E_s^2} = \alpha \overline{E_s^2} + 2\alpha \overline{E_s E_a} + N \Delta z\, q_e \overline{E_s v} \qquad (31-24)$$

ويختصر الحدان $\alpha \overline{E_s^2}$ ، ويكون لدينا :

$$2\alpha \overline{E_s E_a} = N \Delta z\, q_e \overline{E_s v} \qquad (31-25)$$

ونعود الآن إلى المعادلة (19— 30) التي تبين لنا أنه عندما تكون z كبيرة يكون :

$$E_a = \frac{N \Delta z\, q_e}{2\varepsilon_0 c}\, v \qquad \left(\frac{z}{c} \text{ المتأخرة بالمقدار}\right) \qquad (31-26)$$

(وذلك بمعرفة أن $\eta = N \Delta z$ ) . وبوضع المعادلة (26– 31) في الجانب الأيسر من (31-25) نحصل على ما يلي :

$$2\alpha \frac{N \Delta z\, q_e}{2\varepsilon_0 c} \overline{E_s (z \text{ على بعد}) \cdot v\,(z/c \text{ المتأخرة بالمقدار})}$$

ولكن $E_s$ ( على بعدِ z ) يساوي $E_s$ (عند الذرات) متأخراً بالمقدار z/c . ولما كان الوسطي لا يتوقف على الزمن ، فهو إذن نفسه الآن أو متأخراً بالمقدار z/c ، أي أن $\overline{E_s . v \text{ ( عند الذرات )}}$ هو الوسطي نفسه الذي يظهر على الجانب

الأيمن من (25 — 31) . فالجانبان يتساويان إذن عندما يتحقق أن :

$$\frac{\alpha}{\varepsilon_0 c} = 1 \quad \text{أو} : \quad \alpha = \varepsilon_0 c \qquad (31-27)$$

لقد اكتشفنا أنه إذا كان للطاقة أن تكون محفوظة ، فإن الطاقة التي تحملها موجة كهربائية في وحدة المساحة وخلال وحدة الزمن ( أو ما سميناه الشدة ) ينبغي أن تعطى بالمقدار $\varepsilon_0 c \overline{E^2}$ . فإذا سمينا الشدة $\overline{S}$ ، كان لدينا :

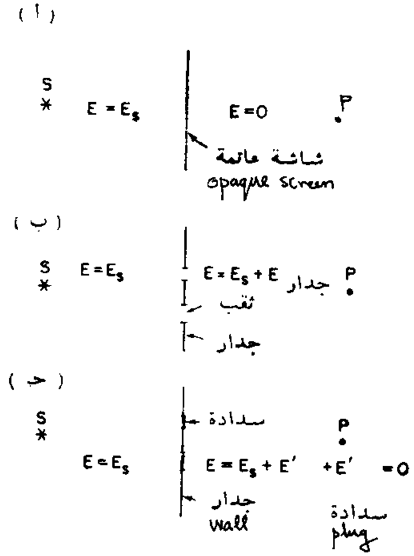
$$\overline{S} = \left\{ \begin{array}{c} \text{الشدة} \\ \text{أو} \\ \text{الطاقة/المساحة/الزمن} \end{array} \right\} = \varepsilon_0 c \overline{E^2} \qquad (31-28)$$

حيث يدل الخط على المتوسط الزمني (time average) . وهكذا حصلنا من نظريتنا في قرينة الانكسار على نتيجة إضافية حسنة .

## ٣١ — ٦ : انعراج الضوء عند حاجز Diffraction of light by a screen

لقد أصبح الوقت الآن مناسباً لأن ننظر في أمر مختلف بعض الشيء يمكننا معالجته بآلية هذا الفصل . ذكرنا في الفصل الأخير أنه عندما يكون لديك حاجز عاتم يستطيع الضوء أن ينفذ من خلال ثقوب فيه ، فإنه يمكن الحصول على توزع الشدة ، أي على نمط الانعراج ، بأن تتصور أنه تحل مكان الثقوب منابع ( أي هزازات ) موزعة توزيعاً منتظماً على الثقب . أي أن الموجة المنعرجة ، بعبارة أخرى ، تكون كما لو أن الثقب كان منبعاً جديداً . وعلينا أن نشرح السبب في ذلك ، لأن الثقب بالطبع هو المكان الذي لا منابع فيه ، والذي لا توجد فيه شحنات متسارعة .

لنسأل أولاً السؤال التالي : « ما هو الحاجز العاتم ؟ » . لنفترض أن لدينا حاجزاً عاتماً تماماً يقع بين منبع S ومشاهد عند P ، كما هو مبين في الشكل [٣١ - ٦ (أ)] . فإذا كان الحاجز « عاتماً » ، فإنه لا يكون هناك أي حقل عند P . فلماذا لا يكون حقل هناك ؟ إنه ينبغي وفقاً للمبادىء الأساسية أن نحصل على الحقل عند P مساوياً الحقل $E_s$ للمنبع متأخراً ، ومضافاً إليه الحقل الذي تولده كل الشحنات الاخرى المحيطة . ولكن ، كما رأينا أعلاه ، تبدأ




الشكل (٣١-٦)
الانعراج عند حاجز

شحنات الحاجز بالحركة تحت تأثير الحقل $E_s$ ، وتولد هذه الحركات حقلاً جديداً ينبغي ، إذا كان الحاجز عاتماً ، أن يُفني تماماً الحقل $E_s$ ، على الجانب الخلفي من الحاجز . ولك أن تقول : « ما هذه المعجزة في أنه يوازنه تماماً ! افترض أن ذلك لم يكن صحيحاً على وجه الضبط ! » . لو لم يكن ذلك صحيحاً على وجه

الضبط ( تذكر أن لهذا الحاجز العاتم ثخناً ما ) لكان الحقل في اتجاه الجزء الخلفي من الحاجز غير مساو للصفر تماماً . وعليه، فإنه نظراً لكونه غير منعدم، يجعل بعض الشحنات الاخرى في مادة الحاجز تتحرك ، فيتولد بذلك حقل صغير إضافي ، يسعى إلى أن يجعل الكلّ متوازناً . وهكذا ، إذا جعلنا الحاجز ثخيناً بما فيه الكفاية ، فانه لايبقى هناك أي حقل ، إذ أن هناك فرصة كافية لان يتم التوازن في آخر الامر . ويمكننا أن نقول ، بدلالة صيغنا السابقة ، أن للحاجز قرينة وهمية كبيرة ، بحيث أن الموجـــة تمتص امتصاصاً أسياً لدى انتشارها خلال مادة الحاجز . ولا شك أنك تعرف أن اللوح الرقيق بما فيه الكفاية والمصنوع من أشد المعادن عتامة كالذهب مثلاً يكون شفافاً بالنسبة للضوء .

لنرَ الآن ماذا يحدث عندما يكون لدينا حاجز عاتم فيه ثقوب ، كما هو مبين في الشكل[ ٣١-٦(ب) ] . فماذا نتوقع أن يكون الحقل عند P ؟إنه يمكن تمثيل الحقل عند P بمجموع جزءين : الحقل العائد للمنبع S مضافاً إليه الحقل العائد للجدار ، أي العائد إلى حركات الشحنات في الجدران . ويمكن أن نتوقع أن تكون حركات الشحنات في الجدران معقدة ، ولكنه يمكننا أن نجد قيم الحقول التي تولدها بطريقة بسيطة حقاً .

افترض اننا نأخذ الحاجز نفسه ، إنما نسد الثقوب فيه كما هو مبين في الجزء ( ح ) من الشكل . لنتصور ان السدادات مصنوعة من مادة الجدار نفسها تماماً . تذكر ان السدادات تقع حيث تقع الثقوب في الحالة ( ب ) من الشكل . لنحسب الآن الحقل عند P . لا شك ان الحقل عند P يساوي الصفر في الحالة ( ح ) ، ولكنه ايضاً يساوي الحقل العائد للمنبع مضافاً إليه الحقل العائد لكل حركات الذرات في الجدران وفي السدادات . ويمكننا ان نكتب المعادلات التالية :

$$E_{\text{عند } P} = E_s + E_{\text{جدار}} \quad \text{في الحالة (ب)}$$

$$E'_{\text{عند } P} = E_s + E'_{\text{جدار}} + E'_{\text{سدادة}} = 0 \quad \text{في الحالة (ح)}$$

حيث تعود الرموز ذوات الفتحة إلى الحالة التي تكون فيها السدادات في أمكنتها ، ولكن $E_s$ واحدة طبعاً في كلتا الحالتين . وإذا طرحنا الآن المعادلة الثانية من الأولى فإننا نحصل على :

$$E_{\text{عند } P} = ( E_{\text{جدار}} - E'_{\text{جدار}} ) - E'_{\text{سدادة}}$$

فإذا لم تكن الثقوب مفرطة في الصغر (أي أن أبعادها تساوي عدة أطوال موجية مثلاً ) ، فإننا نتوقع ألا يغير وجود السدادات الحقول التي تصل الجدران باستثناء إمكان حدوث تغير ضئيل حول أطراف الثقوب . فإذا أهملنا هذا الأثر الصغير ، فإنه يمكننا جعل ( $E'_{\text{جدار}} = E_{\text{جدار}}$ ) ، وأن نحصل على ما يلي :

$$E_{\text{عند } P} = - E'_{\text{سدادة}}$$

وتكون لدينا النتيجة بأن الحقل عند P حينما تكون هناك ثقوب في حاجز (الحالة ب ) هو الحقل نفسه ( باستثناء الإشارة ) الذي يولده ذلك الجزء ، من جدار عاتم كامل ، واقع حيث تقع الثقوب ! ( وليست الإشارة ذات أهمية تذكر ، لأننا نهتم عادة بالشدة التي تتناسب مع مربع الحقل) ، وتبدو محاكمتنا هذه وكأنها محاكمة مذهلة يُفترض فيها سلفاً صحة ما يُراد البرهان عليه . إلا أنها في الواقع ليست صحيحة فحسب ( تقريبياً من أجل ثقوب غير صغيرة جداً ) بل هي مفيدة أيضاً ، وهي تبرير لنظرية الانعراج المألوفة .

ولحسب الحقل ( سدادة $E'$ ) في أية حالة معينة بأن نتذكر أن حركة الشحنات في أي مكان من الحاجز هي تماماً الحركة التي تفني الحقل $E_s$ على الوجه الخلفي من الحاجز . وحينما نعرف هذه الحركات ، نجمع حقول الإشعاع عند P العائدة إلى الشحنات في السدادات فقط .

ونشير مرة أخرى إلى أن نظرية الانعراج هذه ليست إلا نظرية تقريبية ، ولا تصلح إلا إذا لم تكن الثقوب مفرطة في الصغر . أما في حالة الثقوب المفرطة في الصغر ، فإن الحد (سدادة $E'$ ) يكون صغيراً ، ويمكن حينئذ أن يكون الفرق بين ( جدار $E'$ ) و ( جدار $E$ ) ، وهو فرق افترضنا أنه يساوي الصفر ، قريباً أو أكبر من الحد الصغير ( سدادة $E'$ )، فلا يعود تقريبنا صحيحاً حينئذ .

★ ★ ★

## مسائل وتمارين

٣١-١ : أوجد قرينة انكسار الألمنيوم ، وذلك من أجل الأشعة السينية ذات طول الموجة $1.56 \times 10^{-8}cm$ . نفترض أن كل الالكترونات في الألمنيوم لها تواتر طبيعي أقل بكثير من تواتر الاشعة السينية .

٣١-٢ : تساوي قرينة انكسار طبقة الأيونوسفير ، بالنسبة للأمواج الراديوية ذات التواتر $100\ Mc/s$ ، مقدار $n = 0.90$ . أوجد كثافة الالكترونات في السنتمتر المكعب من طبقة الأيونوسفير .

٣١-٣ : إذا علمت أن الحقل الكهربائي لموجة ضوئية تسير في وسط قرينة انكساره n هو : $E = E_0\ e^{i\omega(t - nz/c)}$ فبرهن :

(أ) أن : $n = n' - in''$

$$E = E_0\ e^{-n''\omega z/c}\ e^{i\omega(t-n'z/c)}$$

(ب) استخدم المعادلة :

$$n - 1 = \frac{Nq^2}{2\varepsilon_0 m}\ \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}$$

لإيجاد المعدل الذي تضعف فيه شدة حزمة إشعاع تواتره مساو للتواتر الطبيعي $\omega_0$ للذرة .

٣١-٤ : لقد استنتجنا أن التدفق الآني لطاقة موجة هو : $S = \varepsilon_0 cE^2$ واتاً لكل متر مربع . والمطلوب :

( أ ) أوجد المعدل الكلي لاشعاع الكترون للطاقة عندما يهتز بسعة $x_0$ وبتواتر $\omega$ .

(ب) قارن الطاقة ، التي يشعها الالكترون في الدورة الواحدة ، مع الطاقة المختزنة $\frac{1}{2} m\omega^2 x_0^2$ ، ثم أوجد ثابت التخامد $\gamma_R$ . تسمى هذه العملية التخامد الاشعاعي .

(ح) تعطي ذرة مثارة إشعاعاً بطول موجة معين $\lambda$ . احسب نظرياً عرض الخط الطيفي المتوقع $\Delta\lambda$ ، وذلك إذا فرضنا أن هذا العرض ناشيء عن التخامد الاشعاعي فقط . ( اعتبر أن الذرة هزازة متخامدة صغيرة ذات Q عالية ) .

* * *

# الفصل الثاني والثلاثون

## تخامد الاشعاع . تبعثر الضوء

Radiation Damping, light Scattering

### ٣٢ ــ ١ : مقاومة الاشعاع　　Radiation Resistance

رأينا في الفصل السابق أن جملة شحنات مهتزة تشع طاقة ، وأوجدنا صيغة تعطي الطاقة التي تشعها هذه الجملة . فإذا علمنا الحقل الكهربائي كان جداء متوسط مربع الحقل في $\varepsilon_0 c$ مساوياً كمية الطاقة التي تجتاز في ثانية واحدة متراً مربعاً من سطح يعامد منحى انتشار الاشعاع أي :

$$P = \varepsilon_0 c < E^2 > \qquad (32\text{-}1)$$

إن أي شحنة مهتزة تشع طاقة . فالهوائي ، مثلاً ، الذي يسبب المنبع الخارجي حركة شحناته يشع طاقة . وبموجب مبدأ انحفاظ الطاقة نجد أنه لا بد من مرور طاقة ما عبر الأسلاك الموصلة إلى الهوائي . أي أن الهوائي الموصول بدارة مولد التيار يقوم بدور مقاومة ، أي دور عنصر يمكن للطاقة أن « تضيع » فيه . ( إن الطاقة ، في الواقع ، لا تضيع بل تُشع ، ولكن إذا اقتصرنا على النظر في هذه الدارة فإن الطاقة تضيع ) . وفي المقاومات العادية تتحول الطاقة « الضائعة » إلى حرارة . وفي الحالة الراهنة تذهب الطاقة « الضائعة » في الفضاء . ولكن بموجب

نظرية الدارات الكهربائية ، دون اعتبار أين ذهبت الطاقة ، النتيجة واحدة : هناك طاقة « فقدت » من تلك الدارة . ولهذا يبدو الهوائي بالنسبة إلى المولد وكأن له مقاومة حتى ولو صنع من النحاس الممتاز وفي الواقع إذا صُمم تصميماً جيداً بدا وكأنه مقاومة صرفة ذات وسعية أو تحريضية صغيرة جداً ويستطيع عندئذ أن يشع أكبر قدر من الطاقة . تسمى المقاومة التي يبديها الهوائي مقاومة الاشعاع .

إذا مرّ التيار I إلى الهوائي كان المعدل الوسطي للطاقة التي يتسلمها الهوائي مساوياً متوسط جداء مربع التيار في المقاومة . والمعدل الذي يشع به الهوائي الطاقة متناسب مع مربع التيار فيه ، طبعاً ، لأن كافة الحقول متناسبة مع التيارات والطاقة المتحررة متناسبة مع مربع الحقل : إن ثابت التناسب بين الاستطاعة المشعة و $< I^2 >$ هو مقاومة الاشعاع .

هناك سؤال يثير الاهتمام وهو : ما منشأ مقاومة الاشعاع ؟ لننظر في مثال بسيط ، ولنقل إن التيارات تسري صعوداً وهبوطاً في الهوائي . نعلم أن علينا أن نبذل عملاً إذا أردنا أن يشع الهوائي طاقة . ولو أخذنا جسماً مشحوناً وسرّعناه صعوداً وهبوطاً لشع طاقة . وإذا لم يكن مشحوناً فإنه لا يشع طاقة . ولكن بيان ضياع الطاقة انطلاقاً من انحفاظ الطاقة شيء ، والاجابة عن السؤال : ضد أي قوة نقوم بالعمل شيء آخر تماماً . إن هذا السؤال مشوّق وصعب جداً وليس لدينا ، فيما يخص الالكترونات ، جواب تام ومُرْض على الرغم من أن الجواب ، فيما يخص الهوائيات ، جاهز . فالذي يحصل هو التالي : تؤثر الحقول ، المتولدة من الشحنات المتحركة في جزء من الهوائي ، على الشحنات المتحركة في جزئه الآخر . ونستطيع حساب هذه القوى وإيجاد العمل الذي تنجزه وبالتالي إيجاد صيغة لمقاومة الاشعاع . هذا وإن قولنا « نستطيع حساب القوى » ليس صحيحاً تماماً إذ نحن لا نستطيع لأننا لم ندرس بعد قوانين الكهرباء على مسافات

قصيرة . والذي نعلمه هو الحقل الكهربائي على مسافات كبيرة فقط . ولقد رأينا الصيغة ( 3 — 28 ) ولكنهـا ما زالت بالنسبة إلينا كثيرة التعقيد إذا أردنا حساب الحقول داخل المنطقة الموجية . ونستطيع بالطبع ، ما دام انحفاظ الطاقة صحيحاً ، الوصول إلى النتيجة المضبوطة دون علم بالحقول على مسافات صغيرة . ( يمكن في الحقيقة باستخدام هذه المناقشة استخداماً معكوساً إيجـاد صيغة القوى على مسافات صغيرة إذ تكفي معرفة الحقل على مسافات كبيرة جداً وتطبيق قانون انحفاظ الطاقة ، بيد أننا لن نفعل هذا الآن ) .

أما المسألة في حالة الكترون وحيد فهي التالية : إذا كانت هناك شحنة واحدة فقط فعلى أي شيء يمكن للقوة أن تؤثر ؟ تتصور النظرية الكلاسيكية القديمة الالكترون على هيئة كرة صغيرة يؤثر جزء منها في جزئها الآخر . وبسبب تأخر التأثير عبر الالكترون لا تتفق القوة في الطور تماماً مع الحركة . فلو كان الالكترون ساكناً « لتساوى الفعل ورد الفعل » كما نعلم ، ولتوازنت القوى الداخلية المختلفة بحيث تنعدم محصلتها . أما إذا كان الالكترون متسارعاً فبسبب التأخر الزمني عبره تكون القوة التي يؤثر بهـا قسمه الخلفي على قسمه الأمامي غير مساوية بالضبط للقوة التي يفعل بها قسمه الأمامي في قسمه الخلفي. وهذا التأخر الزمني هو الذي يخل بميزان القوى وتكون النتيجة أن الالكترون يعيق حركته لأنه « يدوس على رباط حذائه » . لقد اصطدم هذا النموذج لمقاومة التسارع ، أي مقاومة الاشعاع لشحنة متحركة ، بصعوبات كثيرة لأن الالكترون ، حسب التصورات الحديثة ، ليس « كرة صغيرة » . وما زالت هـذه المسألة دون حل . ونستطيع مع ذلك أن نحسب بدقة قوة مقاومة الاشعاع ومقدار الضياع الذي يحدث عند تسريع الشحنة على الرغم من جهلنا لآلية عمل هذه القوة .

## ٣٢ ــ ٢ : معدل اشعاع الطاقة    the rate of radiation of energy

سنحسب الآن الطاقة الكلية التي تشعهـــا شحنة متسارعة . وسنعتبر ، كي تكون المناقشة عامة ، حالة شحنة تسارعها اختياري شريطة أن يكون غير نسبوي . ففي اللحظة التي يكون فيها التسارع شاقولياً مثلًا يكون الحقل الكهربائي المتولد مساوياً ، كما نعلم ، جداء الشحنة في مرتسم التسارع المتأخر مقسوماً على المسافة . وهكذا فإننا نعرف الحقل في أي نقطة وبالتالي مربع الحقل الكهربائي والطاقة $\varepsilon_0 c E^2$ التي تجتاز وحدة السطوح في الثانية .

وكثيراً ما يظهر المقدار $\varepsilon_0 c$ في العبارات الخاصة بانتشار أمواج الراديو . ويسمى مقلوبه ممانعة الخلاء وهو عدد سهل التذكر فقيمته $1/\varepsilon_0 c = 377$ أوم . وعلى هذا فإن الاستطاعة في المتر المربع تساوي ، بالوات ، متوسط مربع الحقل مقسوماً على 377 .

ومن عبارة الحقل الكهربائي ( 1 - 29 ) نجد أن :

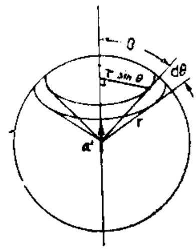
$$S = \frac{q^2 a'^2 \sin^2 \theta}{16 \pi^2 \varepsilon_0 r^2 c^3} \qquad (32 \quad 2)$$

هي الاستطاعة في المتر المربع المشعة في المنحى $\theta$ . ونلاحظ أنهـا تتناسب عكساً مع مربع المسافة كما ذكرنا قبلًا . لنفترض الآن أننا نود معرفة الطاقة الكلية المشعة في كافة المناحي . يجب عندئذ مكاملة العلاقة ( 2 - 32 ) من أجل المناحي . ولهذا نضرب S أولاً بمساحة سطح عنصري لإيجـاد كمية الطاقة التي تنساب ضمن حدود الزاوية الصغيرة $d\theta$ ، انظر الشكل (٣٢ ــ ١) . يلزمنا لذلك مساحة القطاع الكروي . وطريقة حسابها هي التالية :

إذا كان r نصف القطر كان عرض القطاع الحلقي $r\,d\theta$ ومحيطه $2\pi r \sin\theta$ لأن $r \sin\theta$ هو نصف قطر الحلقة . وعلى هذا فإن مساحة هذا الجزء الكروي الصغير هي جداء $2\pi r \sin\theta$ في $r\,d\theta$ أي :

$$dA = 2\pi r^2 \sin\theta \, d\theta \qquad (32\text{-}3)$$

فإذا ضربنا التدفق [ وهو ( 2 — 32 ) الاستطاعة في المتر المربع ] بالمساحة مقدرة بالمتر المربع المحصورة ضمن الزاوية الصغيرة $d\theta$ وجدنا كمية الطاقة




الشكل (٣٢ - ١)
مساحة قطاع كروي هي $2\pi r \sin\theta \, . \, r\,d\theta$

المتحررة في هذا المنحى بين θ و $\theta + d\theta$ . نكامل بعدئذ هذه العبارة من أجل كافة الزوايا بين $0°$ و $180°$ :

$$P = \int S \, dA = \frac{q^2 a'^2}{8\pi \varepsilon_0 c^3} \int_0^{\pi} \sin^3\theta \, d\theta \qquad (32\text{—}4)$$

وليس من الصعب بيان أن $\int_0^{\pi} \sin^3\theta \, d\theta = 4/3$ إذا كتبنا :

$\sin^3\theta = (1 - \cos^2\theta) \sin\theta$ فنجد أخيراً :

$$P = \frac{q^2 a'^2}{6\pi \varepsilon_0 c^3} \qquad (32-5)$$

وهذه العلاقة تستحق التعليق عليها ببعض الملاحظات . أولاً بما أن المتجهة $\vec{a}'$ لها منحى معين فإن $a'^2$ في العلاقة ( 5 – 32 ) هو مربع المتجهة $\vec{a}'$ أي $\vec{a}'.\vec{a}'$ مربع طول المتجهة. ثانياً حسبنا التدفق( 2 – 32 ) باستخدام التسارع المتأخر أي التسارع في اللحظة التي شُعت فيها الطاقة المارة الآن عبر الكرة . قد يخطر لنا أن هذه الطاقة تحررت فعلاً في تلك اللحظة إلا أن هذا ليس صحيحاً تماماً بل مجرد فكرة تقريبية . فيتعذر تعيين لحظة الإشعاع بدقة . وكل ما نستطيع حسابه بدقة هو ما يحدث في حركة كاملة ، كاهتزازة مثلاً أو شيء من هذا القبيل، ينعدم التسارع في نهايتها . ونجد عندئذ أن التدفق الكلي للطاقة في الدورة الواحدة هو متوسط مربع التسارع خلال دورة كاملة . وهذا في الواقع هو ما يجب أن يظهر في العلاقة ( 5 – 32 ) . أو أيضاً إذا كان تسارع الحركة معدوماً في البداية والنهاية كانت الطاقة الكلية التي تشع مساوية تكامل العلاقة ( 5 – 32 ) بالنسبة إلى الزمن .

لنوضح نتائج الصيغة ( 5 – 32 ) فيما يخص جملة مهتزة وذلك بالنظر في حالة شحنة انزياحها x يهتز بحيث يكون التسارع a مساوياً $-\omega^2 x_0 e^{i\omega t}$ . ان متوسط مربع التسارع في خلال دورة هو : ( عند تربيع مقادير مكتوبة بالشكل العقدي يجب الانتباه كثيراً إلى أن الشيء الواجب تربيعه هو جيب التمام وأن متوسط $\cos^2 \omega t$ هو نصف ) :

$$< a'^2 > = \frac{1}{2} \omega^4 x_0^2$$

وبالتالي :

$$P = \frac{q^2 \omega^4 x_0^2}{12\pi \varepsilon_0 c^3} \qquad (32-6)$$

إن هذه الصيغ التي نناقشها الآن راقية نسبياً وحديثة العهد تقريباً إذ تعود إلى

بداية القرن العشرين وهي واسعة الشهرة . ونظراً لقيمتها التاريخية فإنه يهمنا أن يكون في مقدورنا أن نقرأ عنها في الكتب القديمة . وقد استخدمت الكتب القديمة في الواقع جملة وحدات مختلفة عن الجملة المكثية ( الدولية ) الحالية . ومع ذلك نستطيع التخاص من جميع هذه التعقيدات في الصيغ النهائية الخاصة بالكترونات باتباع القاعدة التالية : كان المقدار $q_e^2/4\pi\varepsilon_0$ ، حيث $q_e$ شحنة الالكترون ( بالكولون ) ، يكتب في الماضي $e^2$ . ومن السهل حساب e في الجملة الدولية ( المكثية ) فهو يساوي عددياً $1.5188 \times 10^{-14}$ لأننا نعلم أن $e = 1.60206 \times 10^{-19}$ و $1/4\pi\varepsilon_0 = 8.98748 \times 10^9$ . ولهذا فإننا سوف نستخدم غالباً الرمز المختصر الملائم وهو :

$$e^2 = \frac{q_e^2}{4\pi\varepsilon_0} \qquad (32-7)$$

وإذا وضعنا القيمة العددية السابقة لـ e في الصيغ القديمة واعتبرنا بقية المقادير الداخلة فيها مكتوبة في الجملة الدولية (المكثية) حصلنا على نتائج عددية صحيحة . فالشكل القديم للعلاقة ( 5 – 32 ) مثلاً هو : $P = \frac{2}{3}\, e^2 a^2/c^3$ . والطاقة الكامنة لإلكترون وبروتون تفصلهما المسافة r هي $q_e^2/4\pi\varepsilon_0 r$ أو $e^2/r$ حيث $e = 1.5188 \times 10^{-14}$ SI* .

## ٣٢ ــ ٣ : تخامد الإشعاع Radiation damping

إن فقدان الهزازة للطاقة يعني أنه إذا كان لدينا شحنة على طرف نابض ( أو الكترون في ذرة ) تواتره الخاص $\omega_0$ وهززناه وتركناه وشأنه فإنه لن يهتز إلى الأبد حتى ولو كان موجوداً في الخلاء وتفصله ملايين الأميال عن أي شيء

* SI هو الرمز المختصر للجملة الدولية للوحدات . ( المترجمون )

آخر . وعلى الرغم من عدم وجود زيت أو مقاومة بالمعنى المألوف أو « لزوجة » فإن النابض لن يهتز ، كما سبق وقلنا ، « إلى الأبد » لأنه عندما يكون مشحوناً فإنه يشع طاقة ولهذا يتلاشى اهتزازه ببطء . ولكن بأي بطء ؟ ما هي في هذا الهزاز قيمة المقدار Q الناجم عن الآثار الكهرطيسية ، وهو ما يسمى مقاومة الاشعاع أو تخامد إشعاع الهزاز ؟ إن Q لأي جملة مهتزة يساوي الطاقة الكلية للهزاز في أي لحظة مقسوماً على ضياع الطاقة لكل راديان أي :

$$Q = \frac{W}{dW/d\varphi}$$

ويمكن كتابة Q بشكل آخر إذ أن :

$$dW / d\varphi = (dW / dt) / (d\varphi / dt) = (dW / dt)/\omega$$

$$Q = \frac{\omega W}{dW/dt} \qquad (32-8)$$

فإذا كانت Q معطاة أمكننا إيجاد قانون تلاشي طاقـــة الاهتزاز : $dW/dt = -(\omega/Q)\,W$ وحل هذه المعادلة هو : $W = W_0\,e^{-\omega t/Q}$ حيث $W_0$ الطاقة الابتدائية ( عندما $t = 0$ ) . ولايجاد Q للهزاز المشع نعود إلى الصيغة (8 – 32) ونستخدم العلاقة (6 – 32) عوضاً عن $dW/dt$ . ولكن أي طاقة يجب أن نأخذ على أنها تساوي طاقة الهزاز W ؟ إن الطاقة الحركية للهزاز هي $1/2\,mv^2$ والطاقة الحركية الوسطية هي $m\omega^2 x_0^2/4$ . إلا أننا نذكر أن نصف الطاقة الكلية للهزاز هو وسطياً طاقة حركية والنصف الآخر طاقة كامنة وعلى هذا فإن الطاقة الكلية للهزاز هي ضعف النتيجة السابقة أي :

$$W = \frac{1}{2}\,m\omega^2 x_0^2 \qquad (32-9)$$

والآن ما هو التواتر الذي يجب أن نضعه في صيغنا ؟ إنه التواتر الخاص $\omega_0$

الذي يساوي عملياً تواتر إشعاع الذرة . أما m فنستعيض عنها بكتلة الالكترون $m_e$ ونجد بعد الاصلاح :

$$\frac{1}{Q} = \frac{4\pi e^2}{3\lambda m_e c^2} \qquad (32-10)$$

( لزيادة الوضوح ولتقريب الصيغة من شكلها التاريخي كتبناها باستخدام الرمز المختصر $q_e^2/4\pi\varepsilon_0 = e^2$ وعوّضنا عن $\omega_0/c$ بـ $2\pi/\lambda$ ) . وبما أن Q عديم الأبعاد وجب أن يكون المقدار $e^2/m_e c^2$ الذي يتوقف على شحنة الالكترون وكتلته فقط معبراً عن الخواص الداخلية للالكترون وأن يكون له أبعاد طول . وقد سمي نصف القطر الكلاسيكي للالكترون لأن النماذج الذرية الأولى التي ابتكرت لتفسير مقاومة الاشعاع على أساس قوة تأثير جزء من الالكترون على جزئه الآخر احتاجت كلها إلى الكترون أبعاده من هذه المرتبة . ولكن هذا المقدار فقد معناه القديم ولا نعتبر الآن أن الالكترون له نصف القطر المذكور . والقيمة العددية لنصف القطر الكلاسيكي هي :

$$r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.82 \times 10^{-15}\ \text{m} \qquad (32-11)$$

لنحسب الآن Q لذرة تشع الضوء كذرة الصوديوم مثلاً . إن طول موجة إشعاع ذرة الصوديوم يساوي تقريباً 6000 أنغستروم ويقع في الجزء الأصفر من الطيف المرئي وهو طول موجي نموذجي فنجد :

$$Q = 3\lambda/4\pi r_0 \approx 5 \times 10^7 \qquad (32-12)$$

أي أن Q لذرة ما هو من مرتبة $10^8$ . وهذا يعني أن الهزاز الذري يهتز $10^8$ راديان أو حوالي $10^7$ اهتزازة قبل أن تصغر طاقته e مرة . إن تواتر الضوء المقابل لـ 6000 أنغستروم هو $\nu = c/\lambda$ من مرتبة $10^{15}$ اهتزازة / ثانية

( هرتز ) ولهذا فإن عمر الذرة أي الزمن الذي تستغرقه ريثما تصغر طاقتها e مرة هو من مرتبة $10^{-8}$ ثانية . وتحتاج عادة الذرات الحرة في الشروط العادية إلى هذا الزمن كي تصدر إشعاعها . وهذه النتيجة صحيحة عندما تكون الذرات في الخلاء فقط غير خاضعة لأي مؤثر خارجي . فإذا وجد الالكترون في جسم صلب اصطدم بالذرات والالكترونات الأخرى فتنشأ عندئذ مقاومة إضافية ويغدو التخامد مختلفاً عما كان عليه في الذرة الحرة .

يمكن إيجاد المقاومة الفعالة $\gamma$ في قانون المقاومة للهزاز من العلاقة $1/Q = \gamma/\omega_0$ فإذا تذكرنا أن قيمة $\gamma$ تحدد عرض المنحني التجاوبي في الشكل (٢٣ — ٢) نكون قد حسبنا عرض الخطوط الطيفية للذرات الحرة المشعة ! وبما أن $\lambda = 2\pi c/\omega$ فاننا نجد :

$$\Delta\lambda = 2\pi c\, \Delta\omega/\omega^2 = 2\pi c\, \gamma/\omega_0^2 = 2\pi c/Q\omega_0$$

$$\Delta\lambda = \lambda/Q = 4\pi r_0/3 = 1.18 \times 10^{-14}\ \mathrm{m} \qquad (32 - 13)$$

## ٣٢ — ٤ : المنابع المستقلة Independent Sources

تمهيداً للموضوع الثاني في هذا الفصل ، وهو تبعثر الضوء ، علينا أن نبحث الآن إحدى خصائص ظاهرة التداخل التي أغفلناها فيما سبق . وهذه المسألة هي : متى لا يحدث التداخل . ليكن لدينا المنبعان $S_1$ و $S_2$ ذوا السعتين $A_1$ و $A_2$ ولنفترض أننا نرصد الاشعاع في منحى ما عندما يصل الاهتزازان بالطورين $\varphi_1$ و $\varphi_2$ ( يتوقف الطوران على لحظة الإصدار الفعلية وزمن التأخر الذي يتبع موضع الرصد ) . فنحصل على الطاقة التي نتلقاها بأن نجمع المتجهتين العقديتين $A_1$ و $A_2$ بحيث تكون زاوية الأولى $\varphi_1$ وزاوية الثانية $\varphi_2$ ( كما فعلنا في الفصل التاسع والعشرين ) فنجد الطاقة المحصلة متناسبة مع :

$$A_R^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \qquad (32-14)$$

ولولا وجود الحد الهجين $2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ لكانت الطاقة الكلية التي نتلقاها في منحى معين مساوية لمجموع الطاقتين $A_1^2 + A_2^2$ اللتين يصدرهما المنبعان كل على حدة وهذا ما نتوقعه عادة . أي أن الشدة الإجمالية للضوء الساقط على جسم ما من منبعين تساوي مجموع شدتي الضوءين . ومن جهة أخرى إذا أبقينا على الحد الهجين ، بالاضافة إلى الحدين الاولين ، فإن الشدة الاجمالية لا تساوي مجرد مجموع الشدتين بسبب التداخل . وعندما تجعل الظروف هذا الحد قليل الأهمية نقول عادة إن التداخل ، ظاهرياً ، قد اختفى . ولا ريب في أن التداخل يحدث دائماً في الطبيعة ولكن قد نعجز عن كشفه .

لننظر في بعض الأمثلة . لنفترض أولاً أن المسافة بين المنبعين هي 7 000 000 000 طول موجي وليس هذا بالأمر المستحيل التحقيق . ففي منحى معين يكون لفرق الطور قيمة معينة تماماً . ولكن إذا ابتعدنا عن هذا المنحى قيد شعرة ، بضعة أطوال موجية مثلاً ، وهذه مسافة لا تذكر ( لأن بؤبؤ العين كبير إلى درجة أننا نحس بمتوسط الآثار التي تغطي مدى كبيراً جـداً بمقارنته مع طول الموجة ) تغير بذلك فرق الطور وتغير بالتالي جيب التمام بسرعة كبيرة . فإذا أخذنا متوسط الشدة في منطقة صغيرة أخذ جيب التمام في نقاط هـذه المنطقة قيماً موجبة ثم سالبة ثم موجبة ثم سالبة وتكون القيمـة الوسطية مساوية الصفر .

وهكذا فإن أخذ المتوسط في المناطق حيث يتغير الطور بسرعة كبيرة من نقطة لأخرى يبين أنه لا يوجد تداخل .

مثال آخر : لنفترض أن المنبعين هما هزازتان راديويتان مستقلتان ( وليس هزازة واحدة يغذيها سلكان ، مما يضمن ثبات فرق الطور ، بل هزازتان

مستقلتان ) وأن تواتريها ليسا متساويين بالضبط (من الصعب جداً جعل التواترين متساويين تماماً دون وصل المنبعين بدارة واحدة ) . نحصل في هذه الحالة على ما نسميه منبعين مستقلين . وبالطبع ، نظراً لعدم تساوي التواترين تماما ، فإنه حتى لو كان المنبعان في البدء متفقين في الطور سيبدأ أحدهما يسبق الآخر قليلاً فلا يلبثا أن يصبحا متعاكسين في الطور . ثم يستمر في السبق فيغدوان متفقين من جديد . أي أن فرق الطور بينهما يتغير تدريجياً مع الزمن . ولكن إذا كانت مشاهدتنا تقريبية بحيث لا ندرك ذلك الزمن اليسير ، عندما نأخذ المتوسط على مدى زمن أطول بكثير ، فعلى الرغم من علو الشدة وهبوطها مثل « الخفقان » في الصوتيات ، فإن هذا العلو والهبوط يكون أسرع من أن تتبعه أجهزتنا ويكون متوسط الحد التداخلي مساوياً الصفر هنا أيضاً .

وبعبارة أخرى لا يحدث التداخل في كل مرة ينعدم فيها متوسط الحد الخاص بفرق الطور !

يصادف المرء كتباً كثيرة تقول إن منبعين ضوئيين مختلفين لا يتداخلان أبداً. وليس هذا القول تعبيراً عن واقع فيزيائي ، بل مجرد تعبير عن درجة حساسية الأجهزة التجريبية عند كتابة الكتاب . أمّا ما يحدث في المنبع الضوئي فهو أن إحدى الذرات تشع أولاً ثم تليها أخرى وهكذا . . . ولقد رأينا قبل قليل أن الذرات تشع قطار أمواج لمدة تساوي تقريباً $10^{-8}$ ثانية فقط . فبعد $10^{-8}$ ثانية تنطفىء على الأرجح إحدى الذرات لتحل محلها ذرة أخرى وهلم جرا . ولهذا فإن الأطوار لا تستطيع فعلاً أن تبقى ثابتة الاخلال حوالي $10^{-8}$ ثانية . فإذا أخذنا المتوسط في أثناء زمن أكبر من $10^{-8}$ ثانية بكثير لا نرى أي تداخل بين منبعين مختلفين إذ ليس في وسعها المحافظة على طوريها ثابتين لمدة تفوق $10^{-8}$ ثانية . إلا أن الخلايا الضوئية تسمح بكشف التغيرات السريعة جداً ومن الممكن بيان حدوث التداخل الذي يتغير مع الزمن ، اشتداداً وضعفاً ،

في حوالي $10^{-8}$ ثانية . ولا ريب في أن معظم أجهزة الكشف لا تستطيع تمييز فواصل زمنية قصيرة كهذه . ولهذا فهي لا تشعر بالتداخل . وبطبيعة الحال فإن العين التي تشعر بمتوسط ما يأتيها خلال عشر الثانية لا تستطيع أبداً أن ترى التداخل بين منبعين عاديين مختلفين .

وقد أمكن منذ عهد قريب صنع منابع ضوئية تتجنب هـــذا الأثر وذلك بجعل الذرات تشع ، بعضاً مع بعض ، في نفس الوقت . والجهاز الذي يقوم بهذا شديد التعقيد ولا يمكن فهمه إلا في إطـار الميكانيك الكوانتي ، ويسمى ليزر . ومن الممكن الحصول من الليزر على منبع تواتر تداخله ، أي الزمن الذي يبقى الطور خلاله ثابتاً ، أكبر من $10^{-8}$ ثانية بكثير . فقد يكون من رتبة جزء من مئة أو من عشرة من الثانية ، وقد يبلغ ثانية كاملة . وعلى هذا يستطيع المرء باستخدام خلايا ضوئية عادية أن يعين تواتر التداخل بين ليزرين مختلفين . كما أنه من السهل كشف الخفقان الحاصل بين ليزرين . ولا شك في أنه سيكون من الممكن قريباً إسقاط الضوء من ليزرين على جدار ويكون الخفقان بطيئاً بحيث يستطيع الناظر أن يرى الجدار مضيئاً ثم مظلما !

هناك حالة أخرى ينعدم فيهـا متوسط الحد التداخلي وهي عندما يكون لدينا العديد من المنابع عوضاً عن منبعين اثنين . ففي هذه الحالة سنكتب عبارة $A_R^2$ على أنها مربع مجموع عدد كبير من السعات ( أعداد عقدية ) أي مجموع مربع كلّ واحدة منها مضافاً إليه الحدود الهجينة بين كل زوجين منهـا . فإذا كانت الظروف بحيث تنعدم الحدود الهجينة اختفت آثار التداخل . فمن الجائز أن تكون المنابع المختلفـة موزعة في الفضاء عشوائياً بحيث أن فرق الطور بين $A_2$ و $A_3$ ، رغم ثباته ، يختلف كثيراً عن فرق الطور بين $A_1$ و $A_2$ وهكذا. نحصل عندئذ على العديد من جيوب التمام ، الموجب منها كثير والسالب منهـا كثير فيكون المتوسط معدوما .

هذا هو السبب في أننا لا نرى في كثير من الحالات آثار التداخل ، بل نرى الشدة الكلية فقط التي تساوي مجموع كافة الشدات .

## ٣٢ ـــ ٥ : تبعثر الضوء Scattering of light

يقودنا ما سبق إلى أثر يحدث في الهواء نتيجة لكون مواضع الذرات غير منتظمة . وقد رأينا عندما ناقشنا قرينة الانكسار أن حزمة الضوء الواردة تجعل الذرات تشع من جديد . فالحقل الكهربائي للحزمة الواردة يهز الالكترونات صعوداً وهبوطاً فتشع بسبب تسارعها . وينضم هذا الاشعاع المتبعثر بعضاً إلى بعض ليشكل حزمة لها نفس منحى الحزمة الواردة ولكنها تختلف عنها بالطور وهذا هو منشأ قرينة الانكسار .

ولكن ماذا نستطيع أن نقول عن كمية الضوء التي تشع من جديد في أحد المناحي الأخرى ؟ إذا كانت الذرات موزعة بانتظام شديد في صورة بديعة ، فمن السهل أن نبين أننا لا نجد شيئاً في المناحي الأخرى لأننا نجمع عدداً كبيراً من المتجهات المتغيرة الطور باستمرار وتكون النتيجة صفراً . ولكن إذا كانت هذه الجسيمات موزعة عشوائيا ، كانت الشدة الكلية وفق أي منحى مساوية مجموع الشدات المتبعثرة عن كل ذرة كما رأينا قبل قليل . وفضلاً عن ذلك تتحرك ذرات الغاز باستمرار ولهذا فإنه حتى لو كان لفرق الطور بين ذرتين قيمة معينة في لحظة ما فإن هذه القيمة ستتغير في لحظة لاحقة ، وينعدم بالتالي متوسط كل حد تداخلي ( هجين ) على حدة . لذلك فإنه لإيجاد كمية الضوء التي يبعثرها الغاز وفق منحى معين يكفي أن ندرس الآثار التي تحدثها ذرة واحـــدة ثم نضرب الشدة التي تشعها بعدد الذرات .

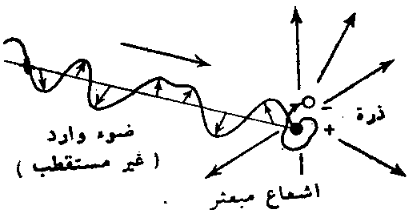
سبق أن لاحظنا أن سبب زرقة السماء هو ظاهرة تبعثر النور . فضوء

الشمس يجتاز الهواء . وعندما ننظر جانبياً ، عمودياً على الحزمة الواردة مثلاً ، نرى ضوءاً أزرق . وعلينا الآن أن نحسب كمية الضوء الذي نراه وأن نفسر زرقته .

إذا كان حقل الحزمة الواردة الكهربائي في موضع الذرة هو $E = E_0 e^{i\omega t}$ فإن الإلكترون في الذرة سيهتز ، كما نعلم ، صعوداً وهبوطاً متجاوباً مع E ، انظر الشكل (٣٢ — ٢) . ومن المعادلة ( 8—23 ) نجد أن سعة الاهتزاز هي :

$$\hat{x} = \frac{q_e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma)} \qquad (32-15)$$

في وسعنا ، لو شئنا ، أن ندخل في اعتبارنا التخامد وإمكان قيام الذرة مقام عدة هزازات ذات تواترات مختلفة وأن نجمع بالتالي هذه التواترات . بيد أننا




الشكل (٣٢—٢)

تسقط حزمة من الاشعاع على ذرة فتحرك شحناتها ( الكتروناتها ) ، وتشع الالكترونات المتحركة بدورها في مختلف المناحي

سنكتفي ، توخياً للبساطة ، بالنظر في هزازة واحدة مهملين شأن التخامد . فتأخذ عبارة السعة الشكل الذي سبق أن استخدمناه في حساب قرينة الانكسار وهو :

$$\hat{x} = \frac{q_e \hat{E}_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \qquad (32-16)$$

نستطيع الآن أن نحسب بسهولة شدة الضوء المتبعثر في مختلف المناحي وذلك باستخدام الصيغة (2—32) والتسارع المقابل لقيمة $\hat{x}$ السابقة .

إلا أننا عوضاً عن ذلك وتوفيراً للوقت سنحسب الكمية الكلية للضوء المتبعثر في كافة المناحي . إن الطاقة الضوئية الكلية التي تبعثرها ذرة واحدة في ثانية واحدة وفي كافة المناحي تعطى بالصيغة (6 - 32) . وبعد الإصلاح تأخذ عبارة الاستطاعة الشكل :

$$P = [(q_e^2\omega^4/12\pi\varepsilon_0 c^3)\ q_e^2E_0^2\,/\,m_e^2\ (\omega^2 - \omega_0^2)^2]$$

$$P = (\tfrac{1}{2}\ \varepsilon_0 c E_0^2)\,(8\pi/3)\,(q_e^4/16\pi^2\varepsilon_0^2 m_e^2 c^4)\,[\omega^4/(\omega^2 - \omega_0^2)^2]$$

$$P = (\tfrac{1}{2}\ \varepsilon_0 c E_0^2)\,(8\pi r_0^2/3)\,[\omega^4/(\omega^2 - \omega_0^2)^2] \qquad (32-17)$$

لقد كتبنا النتيجة بهذا الشكل لكي نتذكر بسهولة : أولاً أن الطاقة الكلية المتبعثرة تتناسب مع مربع الحقل الوارد . فما معنى هذا ؟ من الواضح أن مربع الحقل متناسب مع الطاقة الواردة في الثانية . وفي الواقع فإن الطاقة التي ترد متراً مربعاً في ثانية واحدة تساوي جداء $\varepsilon_0 c$ في متوسط مربع الحقل الكهربائي $< E^2 >$ ، فإذا كان $E_0$ هو القيمة العظمى لـ $E$ يكون $< E^2 > = \frac{1}{2} E_0^2$ وبعبارة أخرى تتناسب الطاقة الكلية المتبعثرة مع الطاقة الواردة على المتر المربع . فكلما اشتد نور الشمس الذي يضيء السماء بدت هذه أكثر سطوعاً .

ثم ما هي نسبة الضوء المتبعثر إلى الضوء الوارد ؟ لنتصور « دريئة » مساحتها $\sigma$ مثلاً و موضوعة في طريق الحزمة ( ليست دريئة حقيقية مادية لأن هذه من شأنها أن تعرج الضوء ، الخ . بل المقصود هو سطح خيالي مرسوم في الفضاء ) . فكمية الطاقة الكلية التي ستعبر السطح $\sigma$ في ظروف معينة تتناسب مع الشدة الواردة ومع $\sigma$ وتساوي :

$$P = \left( \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_0^2 \right) \sigma \qquad (32-18)$$

والآن نبتدع الفكرة التالية : نقول إن الذرة تبعثر كمية إجمالية من الشدة مساوية للكمية التي تسقط على سطح هندسي معين ، ونقدم الجواب بإعطاء مساحة ذلك السطح . فيكون الجواب عندئذ مستقلاً عن الشدة الواردة وهو يعطي نسبة الطاقة المتبعثرة إلى الطاقة الواردة على المتر المربع . وبعبارة أخرى فإن النسبة :

$$\frac{\text{الطاقة الكلية المتبعثرة في الثانية}}{\text{الطاقة الواردة على المتر المربع في الثانية}} \text{ هي } \underline{\text{مساحة}} \; .$$

ومعنى هذه المساحة هو : لو أن كل الطاقة التي ترد هذه المساحة تناثرت في كافة المناحي لكانت مساوية للطاقة التي تبعثرها الذرة .

تسمى هذه المساحة المقطع العرضاني للتبعثر . وتستخدم فكرة المقطع العرضاني في كافة الأحوال التي تكون فيها الظاهرة المدروسة متناسبة مع شدة الحزمة المستعملة . وفي هذه الأحوال يوصف دائماً مقدار التبعثر بتحديد ما ينبغي أن تكون عليه قيمة المساحة الفعالة للهزازة لتقتطع من الحزمة مايُقتطع منها فعلاً . ولا يعني هذا إطلاقاً أن الهزازة تُشْغل فعلاً هذه المساحة الفعالة . ولو لم يكن لدينا سوى إلكترون حر يهتز ذهاباً وإياباً لما كانت هناك أي مساحة تقابله فيزيائياً . إنها مجرد طريقة للتعبير عن جواب مسائل من نوع معين . فهي تخبرنا عن المساحة التي يجب أن تقع عليها الحزمة الواردة للحصول على كمية معينة من الطاقة المتبعثرة . وعلى هذا يكون لدينا في الحالة الراهنة :

$$\sigma_s = \frac{8\pi r_0^2}{3} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2} \qquad (32-19)$$

( يشير الدليل s إلى « التبعثر » ) .

لننظر في بعض الأمثلة . أولاً ، عندما يكون التواتر الطبيعي $\omega_0$ صغيراً جداً ، أو في حالة الالكترون الحر ، فإن التواتر $\omega$ يختصر ويكون المقطع العرضاني ثابتاً . تعرف هذه النهاية الموافقة للتواتر المنخفض، أو المقطع العرضاني للإلكترون الحر ، باسم مقطع تومسون العرضاني للتبعثر . وهو يساوي مساحة مربع ضلعه $10^{-15}$ متراً تقريباً أي مساحة قدرها $10^{-30}$ متراً مربعـاً وهي مساحة صغيرة ولا ريب !

ومن جهة أخرى في حالة تبعثر الضوء في الهواء تكون التواترات الخاصة للهزازات في الهواء أكبر من تواترات الضوء العادي . وهـذا يعني أنه يمكن ، بتقريب أول ، إغفال $\omega^2$ في المخرج فنجد أن التبعثر يتناسب مع القوة الرابعة للتواتر . ومعنى هذا أن الضوء الذي تواتره أكبر بمرتين مثلاً يكون تبعثره أشد بست عشرة مرة وهذا فرق محسوس تماماً . وعلى هذا فان الضوء الأزرق الذي تواتره ضعف تواتر النهاية الحمراء في الطيف يتبعثر أكثر من الضوء الأحمر بكثير . وهكذا فإننا عندما ننظر إلى السماء تبدو زرقاء بهية كما نراها دائماً !

هناك عدة ملاحظات بخصوص النتائج السابقة . فهناك سؤال مثير هو : لماذا نرى الغيوم ؟ من أين تأتي ؟ كلنا نعلم أنها تنشأ بسبب تكاثف بخار الماء . ولكن بخار الماء موجود ، ولا ريب ، في الجو قبل التكاثف فلماذا لا نراه إذن؟ أما بعد تكاثفه فيغدو كامل الوضوح . أي لم يكن مرئياً وفجأة ظهر . ولهذا فإن لغز ظهور الغيوم ليس في الواقع لغزاً صبيانياً مثل « بابا ، من أين يأتي الماء ؟ » بل يجب تفسيره .

لقد بيّنا للتو أن كل ذرة تبعثر الضوء . ولا شك في أن بخار المـاء أيضاً يبعثر الضوء . واللغز هو لمـاذا يبعثر المـاء المتكاثف على شكل غيوم كمية من الضوء أكبر بكثير ؟

لنر ما يحدث إذا كان لدينا ، عوضاً عن ذرة وحيدة ، مجموعة ذرات ، ذرتان مثلا البعد بينهما أصغر بكثير من الطول الموجي . لنتذكر أن أبعاد الذرة هي من رتبة الأنغستروم في حين أن طول موجة الضوء هو حوالي 5000 أنغستروم . ولهذا إذا تجمعت بضع ذرات أمكن أن تكون المسافات الفاصلة بينها أصغر بكثير من طول موجة الضوء . وتحت تأثير الحقل الكهربائي تتحرك كلتا الذرتين معاً . ويكون الحقل الكهربائي المتبعثر مساوياً مجموع حقلين كهربائيين متفقين في الطور ، أي أن سعته هي ضعف السعة في حالة ذرة وحيدة ، وبالتالي تكون الطاقة المتبعثرة مساوية أربعة أمثال الطاقة في حالة ذرة واحدة وليس الضعف ! أي أن « كومة » من الذرات تشع أو تبعثر من الطاقة أكثر مما تفعل فيما لو كانت فرادى . وإن ما زعمناه من استقلال الأطوار كان قائماً على افتراض وجود فرق حقيقي وكبير في الطور بين أي ذرتين ، ولا يصح هذا إلا إذا فصلت بين الذرات عدة أطوال موجية وكانت متوضعة عشوائياً أو متحركة كذلك . أما إذا كانت متجاورة مباشرة فانها بالضرورة سوف تبعثر الضوء باتفاق في الطور ، ويحدث لها تداخل مترابط يؤدي إلى زيادة التبعثر .

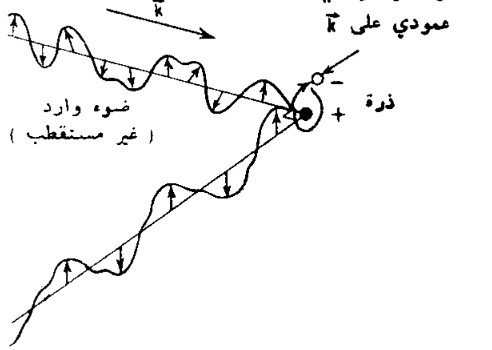
فاذا كان لدينا في الكومة ، وهي عبارة عن قطيرة صغيرة من الماء ، N ذرة أثّر الحقل الكهربائي في كل منها بنفس الشكل وتحركت معاً كما في السابق ( إن تأثير ذرة على أخرى ليس مهماً ، وغرضنا على كل حال هو توضيح الفكرة ) وكانت سعة التبعثر الناجم عن كل ذرة هي نفسها فسيزداد الحقل المتبعثر الكلي N مرة . أما شدة الضوء المتبعثر فتزداد $N^2$ مرة . ولو كانت الذرات متباعدة في الفضاء لكان الازدياد هو N مرة فقط ، بينما هنا تزداد الشدة $N^2$ مرة ! وهذا يعني أن الضوء الذي يُبعثره الماء المتجمع في قطيرات تضم الواحدة منها N جزيئة أشد بـ N مرة من الضوء الذي تبعثره هذه الذرات فرادى . ولهذا يزداد التبعثر بازدياد تكتل الماء . ولكن هل يزداد التبعثر إلى ما لا نهاية ؟ كلا ، بالطبع !

إذن متى تصبح محاكاتنا غير صحيحة ؟ وما هو عـــدد الذرات التي نستطيع تجميعها قبل أن نفقد الحق في تطبيق هذه المحاكات ؟ الجواب : عندما تكبر قطيرة الماء فتصبح أبعادها من رتبة الطول الموجي ، عندئذ لا تكون ذراتها جميعاً متفقة في الطور بسبب كبر المسافة بينها . ولهذا يزداد التبعثر بازدياد حجم القطيرات حتى تقترب أبعاد القطيرة من الطول الموجي وعندئذ تغدو سرعة ازدياد التبعثر بازدياد حجم القطيرة أصغر مما كانت عليه بكثير . وبالاضافة إلى ذلك يختفي اللون الأزرق لأن القطر الأعظم الذي يمكن أن تبلغه القطيرات ، قبل أن يتوقف التبعثر عن الازدياد هو أكبر في حالة الأمواج الطويلة منه في حالة الأمواج القصيرة . وعلى الرغم من أن كل ذرة تبعثر من الأمواج القصيرة أكثر مما تبعثر من الأمواج الطويلة فانه عندما تصبح كافة القطيرات أكبر من الطول الموجي يكون تبعثر النهاية الحمراء من الطيف أشد من تبعثر النهاية الزرقاء ويتغير لون الضوء المتبعثر من الأزرق مقترباً من الأحمر .

يمكن إجراء تجربة تبين ماذكرناه . ففي وسعنا صنع جسيمات تكون في البدء صغيرة جداً ثم يكبر حجمها تدريجياً . ونستخدم لهذا الغرض محلول تحت كبريتات الصوديوم في حمض الكبريت فتترسب حبيبات ناعمة جـداً من الكبريت . وعندما يبدأ الكبريت بالترسب تكون الحبيبات صغيرة جـداً ويكون الضوء المتبعثر مُزرّقاً . ويشتد هذا الضوء بازدياد الكمية المترسبة ويصبح لونه مُبيضاً عندما يكبر حجم الحبيبات . وفضلاً عن ذلك فان الضوء غير المتبعثر يكون قد خسر اللون الأزرق ، وهذا سبب كون ضوء الشمس عند المغيب أحمر ، لأن الضوء الذي يجتاز مسافات كبيرة في الهواء قبل أن يبلغ عيوننا يكون قد بُعثر الكثير من ضوئه الأزرق فيبدو أصفر محمراً .

وأخيراً هناك خاصة مهمة أخرى تتعلق في الواقـع بموضوع الفصل التالي وهو الاستقطاب ، إلا أنها مثيرة إلى درجة تجعلنا نشير إليها الآن ، وتتلخص

في أن الحقل الكهربائي للضوء المتبعثر يهتز في منحى خاص . لكن الحقل الكهربائي في الضوء الوارد مهتزاً في منحى ما . عندئذ تقوم الهزازة باهتزازاتها القسرية في نفس المنحى . فإذا نظرنا إلى الحزمة الواردة بزاوية قائمة تقريباً رأينا ضوءاً مستقطبا أي ضوءاً يهتز حقله الكهربائي في منحى واحد فقط . وتستطيع الذرات، على العموم ، أن تهتز في أي منحى يعامد الحزمة الواردة ولكننا لا نراها عندما تتحرك مقتربة منا أو مبتعدة عنا . فإذا كان الحقل الكهربائي في الضوء الوارد يهتز في كافة المناحي ، وهذا ما نسميه ضوءاً غير مستقطب ، كان لاهتزازة الضوء المتبعثر بزاوية قائمة منحى واحداً فقط ! انظر الشكل (٣٢ - ٣) .




الشكل (٣٢ - ٣)

توضيح منشأ استقطاب الاشعاع المتبعثر بزوايا قائمة على الحزمة الواردة

هناك مادة تسمى مُقطِّباً تتصف بأنها لا تترك من الحقل الكهربائي للضوء الذي يخترقها سوى مركبته وفق محور خاص . ونستطيع استخدام هذا المقطب لاختبار الاستقطاب . وبالفعل فإننا نجد أن الضوء الذي يبعثره محلول تحت كبريتات الصوديوم مستقطب بشدة .

## مسائل وتمارين

٣٢–١ : برهن أنه إذا كانت معادلة حركة مهتز مشحون هي من الشكل :

$$m\, d^2x/dt^2 + \omega_0^2\, x - (2e^2/3c^3)\; d^3x/dt^3 = F\,(t)$$

فإن المشتق الثالث يصف معدل خسارة الطاقة بالاشعاع ( أي المقاومة الاشعاعية ) ، وذلك عند أي تواتر .

تلميح : افترض أن $F\,(t) = A \cos \omega t$ ، وأوجد الطاقة الممتصة من المنبع المغذي .

٣٢–٢ : يمر شعاع ضوئي عبر منطقة تحوي على N مبعثر في وحدة الحجم ، ويساوي المقطع العرضاني الفعلي لكل مبعثر σ . برهن أن شدة الضوء ، بدلالة المسافة x التي يقطعها ، تعطى بالعلاقة :

$$I = I_0\, e^{-N\sigma x}$$

٣٢-٣ : استخدم قانون التبعثر وهو :

$$\sigma = \frac{8\pi}{3}\left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2 \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2}$$

وكذلك القانون الذي سبق استنتاجه ، والخاص بقرينة انكسار غاز ، للبرهان على أن المقدار Nσ يمكن كتابته بالشكل :

$$N\sigma = \frac{2}{3\pi}\,\frac{(n-1)^2}{N}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4$$

( لقد كانت هذه إحدى الطرائق الأولى التي استخدمت لتعيين ثابت أفوغادرو وذلك باستخدام تبعثر السماء الزرقاء ) .

٣٢-٤ : كم يضعف ضوء الشمس الأزرق ذو طول الموجة $\lambda = 4500\ A^\circ$ ، لدى مروره في الغلاف الجوي ، وذلك عندما تكون الشمس ( أ ) في وضع السمت (ب) مائلة على الأفق بـ $10^\circ$ ؟

٣٢-٥ : لقد تم اكتشاف نوع جديد من الاشعاع ( سمي بالأشعة السينية لغموض منشئها ولحداثته ) ، ويظن بأنه أمواج عرضية كالضوء . وقد شوهد تبعثر هـذه الأشعة بالالكترونات في المادة . كيف يمكنك أن تبرهن على أن هـذه الأشعة أمواج عرضية ، وكيف يمكنك أن تبرهن على إمكانية جعلها مستقطبة ؟

٣٢-٦ : ان التاج الداخلي المحيط بالشمس ( والذي يسمى بالتاج K ) هو ضوء الشمس المتبعثر بفعل الكترونات حرة . وتساوي الاضاءة الظاهرية للتاج K ، عند موضع يبعد مسافة نصف قطر الشمس عن حافتها ، حوالي $10^{-8}$ من إضاءة قرص الشمس نفسه ، ( وذلك من أجل وحدة المساحة ) . قدّر عدد الالكترونات الحرة الموجودة في سنتمتر مكعب واحد قرب الشمس .

٣٢-٧ : برهن أن أبعاد المقدار $(\varepsilon_0 c)^{-1}$ هي أبعاد مقاومة ، واحسب قيمته العددية .

٣٢-٨ : تملأ المكان ، الواقع بين الكواكب السيارة ، سحب من حبيبات غبار مؤلفة من الفحم والجليد وعناصر أخرى ولكن بكميات قليلة . احسب الكتلة الدنيا لوحدة المساحة ، مقدرة بالغرام لكل سنتمتر مربع ، للغبار اللازم لحجب منظر النجوم الواقعة خلفها بمقدار مئة ضعف ( أي بمقدار خمس مراتب كوكبية ) ، وذلك بافتراض أن

الغبار من النوع السابق . لاحظ أن بامكان حبيبات الغبـــار أن تحجب ضوء النجم بالتبعثر أو بالامتصاص .

٩-٣٢ : إن بامكان سلك قصير ومستقيم من النحـاس ، موضوع في طريق حزمة من الأمواج الكهرطيسية التي يبثهاهوائي رادار ، أن «يبعثر» بعضاً من الأمواج ، فيحرك الحقل الكهربائي للموجة الالكترونات في السلك ، مما يؤدي إلى إشعاع الموجة « المبعثرة » . ويمكننا أن نفترض ، إذا كان طول السلك قصيراً وأصغر بكثير من $\lambda$ ، أن انزياح الالكتروناتالوسطي في السلك هو فياتجاه محور السلك ، وأن هذا الانزياح متناسب معمركبة الحقل الكهربائي في الاتجاه الموازيللسلك ( بمعنىأنه إذا كان N عدد الالكترونات في السلك، وكان d انزياحها الوسطي الآني ، فان $d = \chi E_{\parallel}$ ، حيث $E_{\parallel}$ هي مركبة الحقل الكهربائي للموجة بالاتجاه الموازي للسلك ) . ونود أن نعلم بدلالة $\chi$ و N ما يلي :

( أ ) ما هو المقطع العرضاني الفعلي الأعظمي لبعثرة السلك ؟

(ب) كيف يتغير المقطع العرضاني الفعلي بتغير توجيه السلك ؟

* * *

# الفصل الثالث والثلاثون

## الاستقطاب

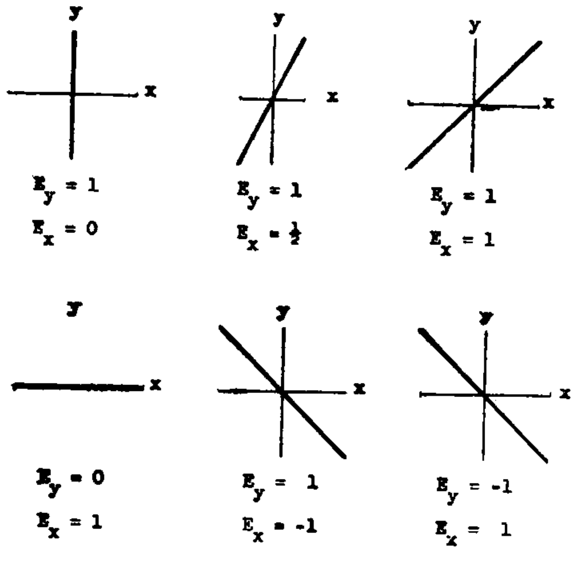
polarization

### ٣٣ ــ ١ : متجه الحقل الكهربائي للضوء the electric vector of light

سننظر في هذا الفصل في تلك الحوادث التي يعتمد تفسيرهـا على أن الحقل الكهربائي ، الذي يصف الضوء ، هو متجهـة . ولم يكن يعنينا منحى اهتزاز الحقل الكهربائي في الفصول السابقة ، ولم يكن يهمنا إلا كون هذه المتجهة واقعة في مستو عمودي على اتجاه الانتشار ، أما الاتجاه في هذا المستوي فلم يكن يهمنا في شيء . وسننظر الآن في الحوادث التي أكثر ما يميزها هو اتجاه اهتزاز الحقل الكهربائي .

يهتز oscillate الحقل الكهربائي ، في ضوء وحيد اللون ، بتواتر وحيد محدّد ، إلا أنه لما كان بامكان المركبة على المحور x ، والمركبة على المحور y ، الاهتزاز بصورة مستقلة بتواتر محدد ، فسننظر باديء ذي بدء في الأثر الحاصل الذي ينتج من تركيب اهتزازتين مستقلتين متعامدتين مثنى مثنى . فما هو نوع الحقل الكهربائي المؤلّف من مركبتين على محورين x و y تهتزان بنفس التواتر ؟ إذا جمع أحدنا اهتزازاً على المحور x مع كمية محددة من اهتزاز على المحور y ، وكان للاهتزازتين طور واحـد ، فإنه سيجد اهتزازاً في اتجـــاه جديد في المستوي xy . ويبين

الشكل (٣٣ – ١) كيفية تركيب اهتزازتين بالاتجاهين x و y وذلك عندما تختلف سعتا الاهتزاز في هذين الاتجاهين . إن المحصلات الظاهرة في الشكل (٣٣ – ١) ليست هي الاحتمالات الوحيدة الممكنة ، فقد افترضنا في جميع هذه الحالات توافق طور الاهتزاز في اتجاهي المحورين x و y ، وقد لا يكون الأمر كذلك ، فمن الممكن أن تكون الاهتزازتان ، في الاتجاهين x و y ، غير متفقتين في الطور .

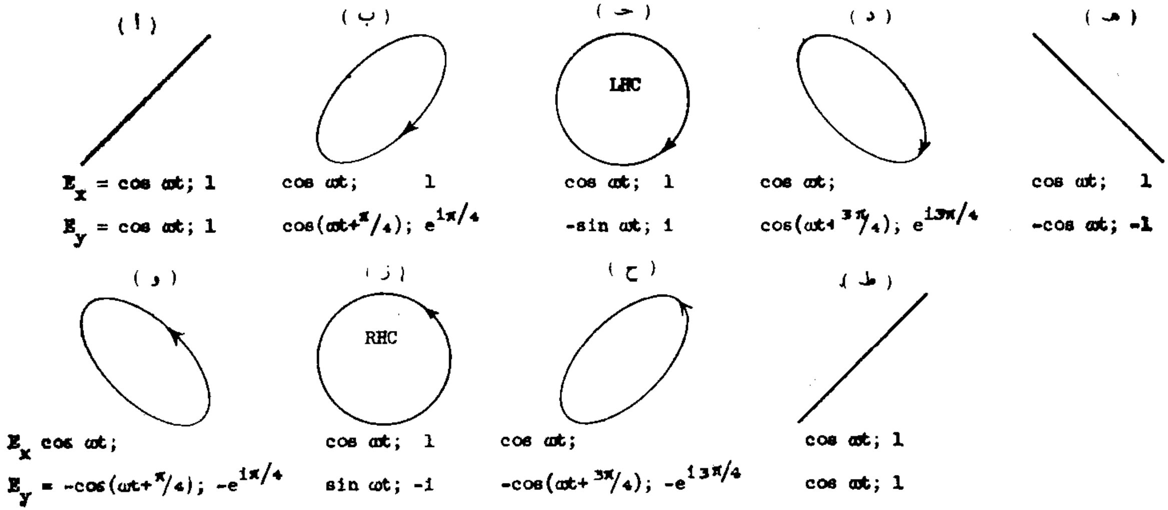



الشكل ( ٣٣ – ١ )
تركيب اهتزازتين متفقتين في الطور
إحداهما محمولة على المحور x والثانية محمولة على المحور y

تدور نهاية متجهة الحقل الكهربائي على قطع ناقص عندما لا تكون الاهتزازة المحمولة على المحور x متفقة في الطور مع الاهتزازة المحمولة على المحور y ، ويمكننا أن نوضح ذلك بطريقة مألوفة . فإذا علقنا كرة بواسطة

خيط طويل بحامل ، بحيث يمكنها الاهتزاز بحرية في مستو أفقي ، فإن الكرة تقوم باهتزازات جيبية. وإذا تصورنا محورين x و y متعامدين فيما بينهما ، وكان مبدؤهما هو وضع استقرار الكرة ، فإن باستطاعة الكرة أن تهتز في أي الاتجاهين x و y بتواتر اهتزاز النواس نفسه . وباختيار مناسب للازاحة الابتدائية للنواس ، وباختيار السرعة البدائية ، فان بامكاننا أن نجعل الكرة تهتز في الاتجاه x ، او في الاتجاه y ، أو في أي خط مستقيم واقع في المستوي xy. وتشبه حركات الكرة هذه اهتزازات متجهة الحقل الكهربائي الظاهرة في الشكل (٣٣ - ١) . ولما كانت الاهتزازة في الاتجاه x ، والاهتزازة في الاتجاه y ، تبلغ في كل حالة سعتها العظمى ، وكذلك سعتها الصغرى ، في اللحظة نفسها ، فان الاهتزازتين في الاتجاهين x و y تكونان متفقتين في الطور . إلا أننا نعلم أن أعم حركة هي حركة الكرة بحيث ترسم قطعاً ناقصاً ، وتحصل هذه الحركة فيما إذا كان الاهتزازان في الاتجاهين x و y غير متفقين في الطور . ويوضح الشكل (٣٣ - ٢) كيفية تركيب اهتزازتين في الاتجاهين x و y عندما لا تكونان متفقتين في الطور ، وذلك من أجل قيم مختلفة لزاوية الطور بين الاهتزاز على المحور x والاهتزاز على المحور y . فالنتيجة العامة إذن هي أن نهاية متجهة الحقل الكهربائي تتحرك على قطع ناقص . وليست الحركة على خط مستقيم إلا حالة خاصة ، وهي تحصل عندما يكون فرق الطور معدوماً ( أو أحد أضعاف $\pi$ ) ؛ وتحدث الحركة على دائرة عندما تتساوى سعتا الاهتزاز ، ويكون فرق الطور بين الاهتزازتين $90°$ ( أو أي ضعف فردي لـ $\frac{\pi}{2}$ ) .

ولقد بيّنا متجهتي الحقل الكهربائي في الاتجاهين x و y في الشكل (٣٣ - ٢) ، واستخدمنا الرموز التخيلية ، وذلك لسهولة التعبير عن فرق الطور باستخدام هذه الرموز . وينبغي أن لا يلتبس أمر المركّبتين الحقيقية والتخيلية لمتجهة الحقل الكهربائي العقدي مع مركبتي الحقل في الاتجاهين x و y .




الشكل ( ٣٣ – ٢ )

تركيب اهتزازتين في الاتجاهين x و y ، لهما نفس السعة ، إلا أن زاوية الطور بينهما مختلفة .

وقد عبّرنا عن المركبتين $E_x$ و $E_y$ مستخدمين الرموز الحقيقية والتخيلية .

فالمركبتان x و y ، المرسومتان في الشكلين (٣٣ – ١) و (٣٣ – ٢) ، هما حقلان كهربائيان حقيقيان يمكننا قياسها ، في حين أن المركبتين الحقيقية والتخيلية ، لمتجهة الحقل الكهربائي العقدي ، ليست إلا تعـابير رياضية تسهّل علينا المناقشة وليس لها مغزى فيزيائي .

سنعمد الآن إلى إيراد بعض المصطلحات والتعاريف . فيقال عن الضوء أنه مستقطب خطياً ( وفي بعض الأحيان مستقطب في المستوي ) عندما يهتز الحقل الكهربائي في خط مستقيم ، ويبين الشكل (٣٣ - ١) الاستقطاب الخطي . وعندما ترسم نهاية متجهة الحقل الكهربائي قطعاً ناقصاً فاننا نقول بأن الضوء مستقطب اهليلجياً . وعندما ترسم نهاية متجهة الحقل الكهربائي دائرة ، فاننا نقول بأن الضوء مستقطب دائرياً . وإذا نظرنا إلى هذه الدائرة ، مستقبلين الضوء وهو ينتشر نحونا ، فوجدنا أن نهاية متجهة الحقل الكهربائي ترسم الدائرة في اتجاه معاكس لدوران عقارب الساعة ، فاننا نكون بصدد ضوء مستقطب دائرياً يمينياً . ويبين الشكل [٣٣ – ٢ ( ز )] ضوءاً مستقطباً دائرياً يمينياً ، في حين يبين الشكل [٣٣ – ٢ (ح)] ضوءاً مستقطباً دائرياً يسارياً . ونفترض في كلتا الحالتين أن الضوء يخرج من الورقة . ويتفق اصطلاحنا هـذا بخصوص الضوء المستقطب الدائري اليميني واليساري مع الاصطلاح المستخدم في حقل الجسيمات التي تبدي سلوكاً استقطابياً ( كالالكترونات مثلاً ) ، إلا أن بعض الكتب في الضوء تستخدم اصطلاحاً مغايراً فيجب الانتباه .

لقد نظرنا في الضوء المستقطب خطياً ، والمستقطب دائرياً ، والمستقطب اهليلجياً ؛ وهذا يشمل كل أنواع الضوء عدا الضوء غير المستقطب . فكيف يمكن للضوء أن يكون غير مستقطب ، إذا قبلنا بأن عليه أن يهتز في أحـد أشكال هذه القطوع الناقصة ؟ إن ذلك ممكن إذا لم يكن الضوء وحيد اللون تماماً ، أو إذا لم يبق الاتفاق قائماً في طور الاهتزاز في الاتجاهين x و y ، فان ذلك

يجعل متجهة الحقل الكهربائي تهتز في بادىء الأمر في اتجاه ما ، ثم في اتجاه آخر بحيث يكون الاستقطاب دائم التغير . ولنتذكر أن الذرة تصدر الضوء في فترة زمنية تقارب $10^{-8}$ ثانية ، فاذا أصدرت ذرة ضوءاً باستقطاب معين ، ثم قامت ذرة أخرى باصدار الضوء باستقطاب آخر ، فإن الاستقطاب يتغير كل $10^{-8}$ ثانية. وإذا تغير الاستقطاب بسرعة تفوق سرعة قدرتنا على اكتشافه ، فإننا نسمي الضوء عندها ضوءاً غير مستقطب ، وذلك لأننا نحصل في هذه الحالة على وسطي آثار الاستقطاب . ولسوف لا تظهر ظواهر التداخل بين الأضواء المستقطبة إذا استخدمنا ضوءاً غير مستقطب . إلا أننا نرى من التعريف أن الضوء يكون غير مستقطب إذا عجزنا عن كشف ما إذا كان الضوء مستقطباً أم لا .

## ٣٣ — ٢ : استقطاب الضوء المتبعثر  polarization of scattered light

سبق لنا أن عالجنا أول مثال على ظاهرة الاستقطاب ، ألا وهو حادثة تبعثر الضوء . لننظر في شعاع ضوئي ينير الهواء ، كشعاع صادر من الشمس مثلاً . فالحقل الكهربائي سيسبب اهتزاز الشحنات في الهواء ، وستشع هـــذه الشحنات المتحركة الضوء بشدة عظمى في مستو عمودي على اتجاه اهتزازهـا . إن ضوء الشمس غير مستقطب ، وعليه فان اتجاه الاستقطاب يتغير باستمرار ، وبالتالي فإن اتجاه اهتزاز الشحنات في الهواء متغير باستمرار . وإذا تأملنا في الضوء المتبعثر بزاوية مقدارها $90°$ ، فإن اهتزاز الجسيمات المشحونة لا يؤدي إلى إشعـاع يبلغ الراصد ، إلا إذا كان الاهتزاز عمودياً على خط نظر الراصد . فيكون الضوء إذن مستقطباً ، ويكون اتجاه الاستقطاب هو اتجاه الاهتزاز نفسه : وعليه فإن التبعثر هو إحدى الطرائق التي تولد ضوءاً مستقطباً .

## ٣٣ ـ ٣ : الانكسار المضاعف Birefringence

إن ثمة ظاهرة أخرى للاستقطاب ، وهي ترتبط بوجود بعض المواد التي تختلف قرينة انكسارها باختلاف اتجاه استقطاب الضوء . لنفترض أن لدينا مادة تتألف من جزيئات غير كروية ، متطاولة في اتجاه ، وقصيرة في اتجاه آخر ، ولنفرض أن هذه الجزيئات مرتبة في المادة بحيث تكون محاورها الطويلة متوازية . فما الذي يحدث إذا مر حقل كهربائي مهتز عبر هذه المادة ؟ لنفرض أن الالكترونات في المادة تستجيب للاهتزازات ، في الاتجاه الموازي لمحاور الجزيئات ، أكثر مما تستجيب للاهتزازات التي تحاول دفعها بالاتجاه العمودي على محور الجزيئات ، وذلك بسبب بنية الجزيئة . فنتوقع عندئذ استجابة مختلفة للضوء المستقطب في الاتجاه الأول أو في الاتجاه الثاني العمودي عليه . دعنا نسمي اتجاه محاور الجزيئات بالمحور الضوئي ، فتكون قرينة الانكسار ، عندما يكون الضوء مستقطباً في اتجاه المحور الضوئي ، مختلفة عن قرينة الانكسار في حالة ضوء مستقطب في اتجاه عمودي على هذا المحور . نسمي مثل هذه المادة مادة ذات انكسار مضاعف . ولمثل هذه المادة قابليتان للانكسار ، أي أن لها قرينتي انكسار ، ويعتمد ذلك على اتجاه الاستقطاب داخل المادة . والآن ما هو نوع المادة التي تتمتع بخاصة الانكسار المضاعف ؟ كي تتمتع مادة بخاصة الانكسار المضاعف ، يجب أن يؤدي سبب ما إلى انتظام جزيئاتها غير المتناظرة بعض الانتظام في اصطفافها . وبالطبع فإن البلورات ذات البنية التكعيبية ، التي لها تناظر المكعب ، لا يمكن أن تكون ذات انكسار مضاعف إلا أن البلورات ذات البنية الأبرية لها بالتأكيد جزيئات غير متناظرة ، وبإمكان المرء أن يلاحظ ظاهرة الانكسار المضاعف فيها بسهولة فائقة .

دعنا ننظر في الآثار التي نتوقعها فيما لو أتونا صفيحة ، من مادة لها خاصة

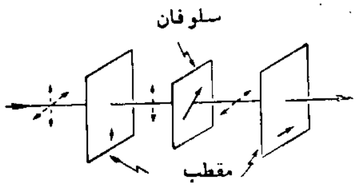
الانكسار المضاعف ، بضوء مستقطب . فإذا كان اتجـاه الاستقطاب موازياً لاتجاه المحور الضوئي ، فإن الضوء يجتاز الصفيحة بسرعة ما ، أما إذا كان اتجاه الاستقطاب عمودياً على اتجاه المحور الضوئي ، فإن الضوء ينفذ من الصفيحة بسرعة مختلفة . ويحدث وضع طريف عندما يكون الضوء مستقطباً خطياً ، وعندما تكون الزاوية بين اتجاه استقطابه واتجاه المحور الضوئي مساوية 45° . لقد رأينا كيف يمكن اعتبار الاستقطاب بزاوية مقدارها 45° ناتجاً عن تركيب استقطابين ، في الاتجاهين x و y ، لهما سعة واحدة وطور واحد ، وذلك ما يمثله الشكل [٣٣ - ٢ ( أ )] . ولما كان الاستقطاب في الاتجاه x ، والاستقطاب في الاتجاه y ، ينتشران بسرعتين مختلفتين ، فإن الاختلاف بين طوريها يتزايد أثناء نفوذ الضوء من المادة . ولذا فعلى الرغم من توافق الاهتزازتين x و y في الطور عند البدء ، أي عند دخول الضوء الصفيحة ، فإن فرق الطور داخل هذه الصفيحة يكون متناسباً مع العمق في المادة . وكلما تقدم الضوء في المادة ، فإن الاستقطاب يتغير على النحو الذي يظهر في الشكل (٣٣ ٢) . فإذا كان ثخن الصفيحة بحيث يولّد فرقاً في الطور مقداره 90° بين الاستقطابين في الاتجاهين x و y ، كما هو مبين في الشكل [٣٣ - ٢ (ح)] ، فإن الضوء الناتج يكون مستقطباً دائرياً . نسمي الصفيحة التي يسبب ثخنها حدوث ذلك صفيحة ربع موجية ، وذلك لأنها تسبب فرقاً في الطور مقداره ربع دورة بين الاستقطاب في الاتجاه x والاستقطاب في الاتجاه y . وإذا مر ضوء مستقطب من صفيحتين ربع موجيتين ، فإنه يبرز ضوءاً مستقطباً في المستوي ثانية ، إلا أن اتجاه استقطابه يكون عمودياً على الاتجـاه الأصلي ، وذلك ما نراه في الشكل [٣٣ - ٢ (هـ)] .

وبإمكان المرء أن يوضح هذه الحادثة باستخدام قطعـة من السلّوفان . ويتألف السلوفان من جزيئات طويلة على هيئة الألياف ، وهو مادة غير متماثلة

المناحي ، وذلك لأن الألياف فيه تميل إلى الاصطفاف باتجاه معين . ونحتاج لتوضيح حادثة الانكسار المضاعف إلى ضوء مستقطب استقطاباً خطياً ، وبإمكاننا أن نحصل على ذلك بسهولة بإمرار ضوء غير مستقطب عبر صفيحة مقطِّبة . وسندرس المقطِّب بالتفصيل فيما بعد ، وهو يتمتع بخاصة إمرار الضوء المستقطب خطياً إذا كان اتجاه الاستقطاب موازياً لاتجاه محور المقطب ، فلا يمتص عندئذ منه إلا القليل ؛ في حين أنه يمتص بشدة الضوء المستقطب في اتجاه عمودي على اتجاه محور المقطب . فإذا ورد ضوء غير مستقطب على صفيحة المقطِّب مر عبرها ذلك الجزء من الضوء غير المستقطب الذي يهتز باتجاه مواز لمحور المقطب ، فكان الضوء النافذ من المقطب مستقطباً استقطاباً خطياً . وتفيدنا خاصة المقطب هذه في كشف اتجاه استقطاب ضوء مستقطب خطياً ، وفي بيان ما إذا كان ضوء ما مستقطباً خطياً أم لا . فما على المرء إلا أن يمرر حزمة الضوء عبر صفيحة المقطب ، ويدير هذه الصفيحة في مستو عمودي على الحزمة . فإذا كان الضوء مستقطباً خطياً ، لم ينفذ عبر الصفيحة إذا كان اتجاه محور المقطب عمودياً على اتجاه الاستقطاب . أما إذا أدير محور صفيحة المقطب بزاوية قدرها °90 ، فأصبح بذلك موازياً لاتجاه استقطاب الضوء ، فإن الضوء ينفذ عندئذ من المقطب دون أن تضعف شدته إلا قليلاً . أما إذا كانت الشدة النافذة من المقطب مستقلة عن توجيه المقطب فإن الضوء الوارد يكون ضوءاً غير مستقطب خطياً .

ولكي نوضح ظاهرة الانكسار المضاعف للسِّلوفان نستخدم صفيحتين مقطبتين ونضعها على النحو الظاهر في الشكل (٣٣ - ٣) . فالمقطب الأول يعطي ضوءاً مستقطباً خطياً ، فيمر هذا الضوء عبر السلوفان ، ثم عبر الصفيحة المقطبة الثانية ، التي تعمل على كشف أثر السلوفان في الضوء المستقطب الذي مر خلالها . فإذا وضعنا بادىء ذي بدء محوري المقطبين بحيث يكونان متعامدين مع بعضها ، ثم رفعنا صفيحة السلوفان ، فإن الضوء النافذ من المقطب الثاني

يكون معدوماً . أما إذا أدخلنا صفيحةالسلوفان بين المقطبين ، وأدرنا الصفيحة حول محور ينطبق على الأشعة الواردة ، فإننا نلاحظ في الحالة العامة أن السلوفان يجعل جزءاً من الضوء قادراً على المرور عبر المقطب الثاني . إلا أن هناك اتجاهين .




الشكل (٣٣ - ٣)

تجربة لتوضيح ظاهرة الانكسار المضاعف للسلوفان. وقد أشرنا إلى متجهات الحقل الكهربائي للضوء بخطوط منقطة ،كما أشرنا إلى محور تمرير صفيحتي المقطب والمحور الضوئي للسلوفان بأسهم . والضوء الوارد من اليسار هو ضوء غير مستقطب .

اثنين لصفيحة السّلوفان ، وهما اتجاهان متعامدان مع بعضها ، لا يسمحان بمرور أي ضوء عبر المقطب الثاني . وهذان الاتجاهان ، اللذان يسمحان بمرور الضوء المستقطب خطياً عبر صفيحة السّلوفان دون أن يؤثر ذلك المرور على اتجـــاه الاستقطاب ، همــا الاتجاه الموازي للمحور الضوئي لصفيحة السلوفان والاتجــاه العمودي على هذا الاتجاه .

إننا نفترض أن الضوء يمر عبر السلوفان بسرعتين مختلفتين في هذين الاتجاهين ، إلا أن الضوء النافذ من الصفيحة لا يغير من اتجاه استقطابه . أما إذا أديرت صفيحة السّلوفان بحيث تأخذ وضعاً وسطاً بين هذين الاتجاهين ، وهو الوضع الظاهر في الشكل (٣٣ — ٣) ، فإننا نرى أن الضوء النافذ من المقطب الثاني يكون شديداً .

إن ثخن السِّلوفان العادي المتداول تجارياً قريب من أن يكون ثخناً معادلاً ثخن الصفيحة نصف الموجية ، وذلك بالنسبة لمعظم الألوان الموجودة في الضوء الأبيض . وتسبب صفيحة من هذا النوع دوران محور الضوء المستقطب خطياً بزاوية مقدارها 90° ، وذلك عندما يصنع شعاع الضوء المستقطب خطياً زاوية مقدارها 45° مع اتجاه المحور الضوئي ، أي أن الشعاع الضوئي البارز من السلوفان يكون مهتزاً بالاتجـاه الصحيح الذي يمكِّنه من المرور عبر الصفيحة المقطبة الثانية .

وإذا استخدمنا الضوء الأبيض في تجربتنا التوضيحية ، فإن ثخن صفيحـة السِّلوفان يكون مساوياً ثخن الصفيحة نصف الموجية من أجل مركبة واحدة فقط من مركبـات الضوء الأبيض ، فيكون لون الضوء النافذ من لون هـذه المركَّبة . ويعتمد لون الضوء النافذ على ثخن صفيحة السلوفان ، وبامكاننا أن نغير الثخن الفعلي للسلوفان إذا أملناه بحيث يمر الضوء عبر السلوفان بزاوية ما ، فنزيد بذلك من طول مسار الضوء في السلوفان . فإذا أميلت الصفيحة تغير لون الضوء النافذ . وإذا استخدمنا السلوفان بأثخان متفاوتة حصلنا على مرشحات تمرر أضواءً بألوان مختلفة . ولهذه المرشحات خاصة مهمة وهي أنها تسمح بمرور لون واحد عندما يكون اتجاها محوري المقطبين متعامدين مع بعضهما ، في حين أنها تمرر الضوء المتمم له إذا كان محورا المقطبين متوازيين .

وثمة تطبيق هـام آخر للجزيئات المصطفة وهو تطبيق عملي جـداً . فبعض المواد البلاستيكية تتألف من جزيئات طويلة جداً ومعقدة تلتف على بعضهـا بعضاً . وإذا اعتنينا بتصلب البلاستيك ، فإن الجزيئات تلتف جميعـاً بعضاً على بعض ، ونحصل بذلك على عـــدد من الجزيئات يكون مصطفاً في اتجاه ما ، وعلى عدد مساوٍ يكون مصطفاً في اتجاه آخر ، ولا يكون البلاستيك الناتج متمتعاً بخاصة الانكسار المضاعف . وتعالج المادة عادة أثناء تصلبهـا ، فتطبق

عليها اجهادات وتشوهات ، وبالتالي لا تكون المادة الناتجة متماثلة المناحي تماماً . إلا أننا إذا شددنا قطعة بلاستيكية كهذه، فإنها تسلك سلوك رزمة من الخيوط، فيصبح عندها عدد الخيوط في اتجاه الشد أكبر من عددها في الاتجاهات الأخرى. أي أنه إذا شدت بعض المواد البلاستيكية ، أصبحت مادة لها خاصة الانكسار المضاعف . وبإمكان المرء أن يرى آثار الانكسار المضاعف بامرار ضوء مستقطب عبر المادة البلاستيكية . وإذا فحصنا الضوء النافذ بصفيحة مقطبة ، تبدت لنا أهداب مضيئة وأخرى مظلمة ( وتكون هذه الأهداب ملونة إذا استخدمنا الضوء الأبيض ) . ويتغير موضع هذه الأهداب بفعل الاجهاد المطبق على العينة ويمكننا، بتعداد الاهداب وبتحديد منطقة تجمعها ، أن نحسب الاجهاد المطبق. ويستخدم المهندسون هذه الحادثة كوسيلة لإيجاد الاجهادات في القطع ذوات الأشكال الغريبة التي يصعب عليهم حساب الاجهادات فيها .

ويمكننا الحصول على انكسار مضاعف بطريقة أخرى هامة ، وهي استخدام مادة مائعة . لننظر في مائع مركب من جزيئات غير متناظرة طويلة تحمل قرب طرفيها شحنات موجبة وسالبة ، بحيث يمكننا النظر إلى الجزيئة وكأنها ذو قطبين كهربائي . وستكون هذه الجزيئات بفعل تصادماتها موجهة توجيهاً عشوائياً في الحالة العادية ، وسيكون عدد الجزيئات ، المصطفة في اتجاه ما ، مساوياً عددها المصطف باتجاه آخر . أما إذا طبقنا حقلاً كهربائياً فإن الجزيئات تميل إلى الاصطفاف ، ويصبح المائع ، عند تحقق ذلك ، ذا خواص انكسار مضاعف . وإذا استخدمنا صفيحتين مقطبتين وخلية شفافة حاوية على مائع قطبي، فإن بامكاننا أن نبتكر ترتيباً معيناً له خاصة إمرار الضوء عندما يكون الحقل الكهربائي مطبقاً وحسب . وبالتالي فإننا نحصل على مفتاح كهربائي للضوء ، وتدعى الخلية التي تتمتع بهذه الخاصة خلية كِرْ (Kerr) . ونسمي هذه الحادثة التي تمكّن الحقل الكهربائي من جعل بعض الموائع تتمتع بخاصة الانكسار المضاعف حادثة كِرْ .

## ٣٣ ـ ٤ : المقطبات polarizers

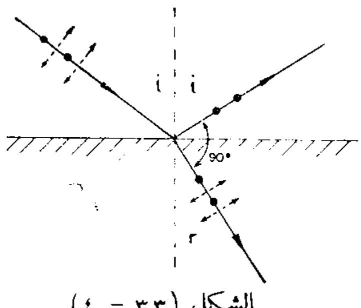
لقـــد نظرنا فيما مضى في مواد تختلف قرينة انكسارها باختلاف اتجـاه استقطاب الضوء . وهناك بلورات بالغة الأهمية عملياً تختص بأن قرينة انكسارها، وكذلك درجة امتصاصها للضوء المستقطب ، تختلف باختلاف اتجـاه استقطاب الضوء الوارد عليهـــا . وبامكاننا استخدام الأسس ، التي شرحنا بها فكرة الانكسار المضاعف ، لنفسر بها تفاوت المواد في قدرتها على امتصاص الضوء ، بأنه ناتج من الاتجاه الذي تجبر فيه الشحنات على الاهتزاز في وسط غير متماثل المناحي . ونذكر من هذه المواد التورمالين ، وهو مادة مشهورة ومعروفة منذ القديم ، والبولارويْد مادة ثانية . ويتألف البولارويْد من طبقـة رقيقة من بلورات صغيرة من بلورات الهيرباثايت (وهو ملح مركـب من اليود والكينين) ، تصطف بحيث تتوازى محاورها فيما بينها . ولهذه البلورات خاصة امتصاص الضوء عندما تكون اهتزازاته في منحى معين ، ولا تمتص من الضوء إلا النذر اليسير عندما يكون اتجاه الاهتزاز في اتجاه آخر .

لنفترض أننـا أرسلنا ضوءاً في صفيحـة مقطـِّبة ، ولنفترض أن اتجـــاه الاستقطاب الخطي للضوء يميل بزاوية $\theta$ على اتجاه تمرير المقطب . فمـا هي الشدة التي تنفذ من الصفيحة المقطبة ؟ إن بامكاننا تحليل الضوء الوارد إلى مركـبة عمودية على اتجاه التمرير ، وهي تتناسب مع $\sin\theta$ ، وإلى مركبة موازية لاتجاه التمرير ، وهي تتناسب مع $\cos\theta$ . فالسعة التي تمر من المقطب هي المركـبة $\cos\theta$ ، وسيحصل امتصاص للمركـبة $\sin\theta$ . فتكون سعة الاهتزازة النافذة من المقطب أصغر من السعة الواردة عليه بمقدار $\cos\theta$ . وتكون الطاقـة النافذة من المقطب ، أي شدة الضوء النافذ ، متناسبة مع $\cos^2\theta$ . فتكون شدة الضوء النافذ ، عندما يكون الضوء الداخـل مستقطباً ومائلاً بزاوية $\theta$ على

اتجاه التمرير ، هي $\cos^2\theta$ . وتكون شدة الضوء الممتص بالطبع مساوية $\sin^2\theta$ .

ويتبدى لنا لَبْس إذا نظرنا في الوضع التالي . فنحن نعلم أنه لا يمكننا إمرار الضوء عبر مقطبين إذا كان محوراهما متعامدين . أما إذا وضعنا مقطباً ثالثاً بين المقطبين الأولين ، بحيث يميل محور تمريره بزاوية مقدارها $45°$ على المحورين المتعامدين ، فإن بعض الضوء ينفذ . ونعلم أن المقطب يمتص الضوء ، وليست له القدرة على خلق هذا الضوء . ومع ذلك فإن إضافة المقطب الثالث ، الذي يميل محوره بزاوية مقدارها $45°$ ، سمح لضوء أكثر بالمرور . إننا نترك تعليل هذه الظاهرة للطالب كتمرين .

ومن الأمثلة الهامة جداً على الاستقطاب حادثة انعكاس الضوء على سطح ، وهي طبعاً حادثة لا تستدعي استعمال بلورات معقدة أو مواد صعبة ، بل انها حادثة تحصل في أبسط الحالات وأكثرها شيوعاً . فإذا انعكس الضوء على سطح زجاجي ، فقد يكون الضوء المنعكس مستقطباً ! وسواء لدينا أصدّقت ذلك أو كنت له من المكذبين . والتعليل الفيزيائي لذلك بسيط . فقد اكتشف بروستر تجريبياً أن الضوء المنعكس على سطح هو ضوء مستقطب تماماً عندما تكون الزاوية بين الشعاع المنكسر والشعاع المنعكس مساوية إلى $90°$ . ويتحقق هذا الشرط في الشكل (٣٣ - ٤) . أما إذا كان شعاع الضوء الوارد




الشكل (٣٣ - ٤)

انعكاس الضوء المستقطب خطياً والوارد بزاوية بروستر . وقد أشير الى اتجاه الاستقطاب بأسهم منقّطة ، في حين أشرنا بنقط دائرية الى الاستقطاب العمودي على صفحة الكتاب

مستقطباً ، وكان اتجاه استقطابه واقعاً في مستوي الورود فلسوف لا يحدث للشعاع أي انعكاس . ولا ينعكس الضوء إلا إذا كان اتجاه الاستقطاب عمودياً على مستوي الورود . إن إدراك سبب ذلك سهل . فالضوء في المادة العاكسة مستقطب عرضياً ، ونعلم أن الذي يولد الضوء الصادر هو حركة الشحنات في المادة ، وهذا الضوء الصادر هو ما نسميه بالضوء المنعكس . إن منبع هذا الضوء المنعكس ليس هو مجرد انعكاس الضوء الوارد ، بل إن فهمنا الأعمق للحادثة يشير إلى أن الضوء الوارد يُجبر الشحنات في المادة على الاهتزاز ، ثم تقوم هذه الشحنات المهتزة بدورها بتوليد الضوء المنعكس . ويتضح من الشكل (٣٣ - ٤) أن الاهتزازات العمودية فقط على صفحة الكتاب قادرة على الاشعاع باتجاه الانعكاس ، وبالتالي فإن الضوء المنعكس هو ضوء مستقطب باتجاه عمودي على مستوي الورود . أما إذا كان الشعاع الوارد مستقطباً ، وكان اتجاه استقطابه واقعاً في مستوي الورود ، فإن الضوء المنعكس ينعدم .

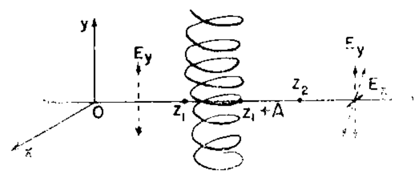
ويمكننا توضيح هذه الحادثة بسهولة إذا حاولنا أن نعكس ضوءاً مستقطباً خطياً على صفيحة زجاج مستوية . فإذا أديرت صفيحة الزجاج بحيث تتغير زاوية ورود الضوء المستقطب ، فإننا نلاحظ انخفاضاً ملحوظاً في شدة الضوء المنعكس ، عندما تمر زاوية الورود بزاوية بروستر . ولا نلاحظ هذا الانخفاض في الشدة إلا إذا كان اتجاه الاستقطاب واقعاً في مستوي الورود . أما إذا كان اتجاه الاستقطاب عمودياً على مستوي الورود فإننا نلاحظ الشدة المألوفة في الضوء المنعكس مهما تغيرت زاوية الورود .

### ٣٣ ـ ٥ : الفعالية الضوئية optical activity

إننا نلاحظ آثاراً هامة أخرى للاستقطاب في المواد المركبة من جزيئات

ليس لها تناظر الانعكاس ، فهي جزيئـات تشبه في ترتيب ذراتها مظهر المفتاح نازع الفلين من القوارير ، أو مظهر قفاز اليد ، أو أي مظهر آخر إذا نظرنا إليه في مرآة بدا لنا معكوساً تماماً ، كما يحصل لقفـاز اليد اليسرى الذي ينعكس في المرآة فيبدو قفاز يد يمنى . لنفترض أن جميع الجزيئات في المادة متماثلة ، أي أنه لا توجد جزيئة هي نظير جزيئة اخرى في مرآة . إن لمثل هـذه المادة ظاهرة طريفة نسميها الفعّالية الضوئية ، ويحصل بسبب هذه الفعـالية أن يدور اتجاه استقطاب الضوء المار من المادة حول المحور الذي ينتشر فيه الضوء .

إن فهم الفعالية الضوئية يحتاج إلى بعض الحسابات ، إلا أن بامكاننا أن نرى بصورة وصفية سبب حصول هذه الفعالية، دون أن نقوم بإجراء الحسابات. لنتأمل في جزيئة غير متناظرة تترتب ذراتها على هيئة لولب ، وعلى النحو المبين في الشكل (٣٣ - ٥) . ونود أن نشير إلى أنه ليس ضرورياً أن يكون الشكل الفعلي للجزيئات على هيئة مفتاح القوارير كي تبدي فعالية ضوئية ، إلا أن هذه




الشكل (٣٣-٥)

يمثل الشكل جزيئة لا تبقى هيئتها على حالها إذا عكست في مرآة ، وهو يوضح النتائج المتوقعة عندما يرد ضوء مستقطب خطياً في الاتجاه y على هذه الجزيئة

الهيئة بسيطة ، ونأخذها كنموذج نقيس على سلوكه سلوك كل الجزيئات التي لا تتمتع بتناظر الانعكاس . فإذا سقط ضوء مستقطب خطياً في الاتجاه y على هذه الجزيئة ، فإن الحقل الكهربائي يجبر الشحنات فيها على الاهتزاز إلى أعلى اللولب وأسفله ، الأمر الذي يؤدي إلى توليد تيار كهربائي في الاتجاه y ، وإلى إشعاع حقل كهربائي $E_y$ مستقطب في الاتجاه y . إلا أنه إذا كانت الالكترونات مقيدة في حركتها بحيث لا يسمح لها بالحركة إلا في اتجاه اللولب ، فإن على الشحنات أن تتحرك في اتجاه المحور x أيضاً في الوقت الذي تتحرك فيه للأعلى وللأسفل . وإذا سار تيار نحو الطرف العلوي للولب ، فإن هذا التيار يسري داخلًا صفحة الكتاب في الموضع $z = z_1$ ، وخارجاً من هذه الصفحة في الموضع $z = z_1 + A$ ، حيث ترمز A إلى قطر اللولب الجزيئي . وبإمكان المرء أن يفترض أن التيار في الاتجاه x لا يولـّد إشعاعا ، وذلك لأن التيارات متعاكسة على طرفي اللولب . إلا أننا إذا تأملنا في المركبة في الاتجاه x للحقل الكهربائي الذي يبلغ النقطة $z = z_2$ فإننا نرى أن الحقل الذي أشعّه التيار في الموضع $z = z_1 + A$ والحقل الذي أشعّه في الموضع $z = z_1$ ، يصلان إلى $z_2$ ، ويكون الفاصل الزمني بين لحظتي وصولهما مساوياً إلى $A/c$ ، وعليه فهما مختلفان في الطور بمقدار $\pi + \omega A/c$ . ولما كان فرق الطور لا يساوي $\pi$ تماماً ، فإن الحقلين لا يعدم أحدهما الآخر ، فتبقى مركبة صغيرة في الاتجاه x للحقل الكهربائي المتولد من حركة الالكترونات في الجزيئة ، في حين أن الحقل الكهربائي الذي ولـّد ذلك هو حقل ليس له إلا مركبة في الاتجاه y . فإذا أضيفت هذه المركبة الصغيرة في الاتجاه x إلى المركبة الكبيرة في الاتجاه y ، فإن الحقل الناتج سيميل قليلًا على المحور y ، وهو اتجاه الاستقطاب الأصلي . وكلما اخترق الضوء المادة ، دار اتجاه الاستقطاب حول المحور الذي ينتشر فيه الضوء . وإذا رسمنا أمثلة أخرى قليلة ، ونظرنا في التيارات المتولدة بفعل حقل كهربائي ، تكوّنت لدينا

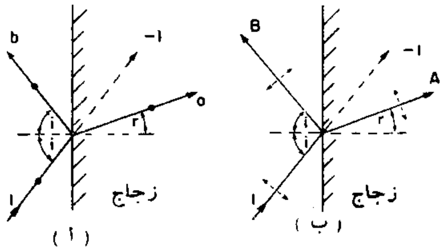
قناعـة بخصوص وجود الفعـالية الضوئية واستقلال هـذه الفعالية ، وكذلك استقلال اتجاه دورانها عن توجيه الجزيئات نفسها .

إن سكر العنب مثال معروف على مادة تتمتع بالفعـالية الضوئية . ويمكن توضيح الحادثة بسهولة إذا استخدمنا مقطّباً لتوليدضوء مستقطب خطياً، فإذا أمررنا هـذا الضوء المستقطب عبر خلية مملوءة بسكر العنب ، أمكننا اكتشاف دوران مستوي الاستقطـاب باستخدام مقطب آخر موضوع بعد الخلية .

The intensity of reflected light

## ٣٣ ــ ٦ : شدة الضوء المنعكس

دعنا الآن ننظر كمياً في قيمة عامل الانعكاس ، ولندرس تغير هـذه القيمة بتغير الزاوية . يبين الشكل [٣٣ – ٦ ( أ )] شعاعاً ضوئياً وارداً على سطح زجاجي ، فينعكس قسم منه وينكسر القسم الآخر في الزجاج . ولنفترض أن




الشكل (٣٣ – ٦)

موجة واردة سعتها الوحدة تنعكس وتنكسر على سطح زجاجي . في ( أ ) الموجة الواردة مستقطبة خطياً واتجاه استقطابها عمودي على مستوي الورقة . في (ب) الموجة الواردة مستقطبة خطياً ، وقد بينا اتجاه استقطابها بأسهم منقطة توضّح متجهة الحقل الكهربائي .

سعة الشعاع الوارد تساوي الوحدة ، وأنه مستقطب خطياً بحيث يكون اتجاه استقطابه عمودياً على مستوي الورقة . سنسمي سعة الموجـة المنعكسة b وسعة الموجـة المنكسرة a . إن الضوء المنعكس ، وكذلك الضوء المنكسر ، سيكونان بالطبع ضوءان مستقطبان خطياً ، وستكون متجهات الحقول الكهربائية للأمواج الواردة والمنعكسة والمنكسرة متوازية فيما بينها. إن الشكل [٣٣ - ٦(ب)] يبين وضعاً مماثلاً إلا أننا نفترض فيه أن الموجة الواردة، ذات السعة المساوية للوحدة ، مستقطبة خطياً ، وأن اتجاه استقطابها واقع في مستوي الورقة . لنرمز في هذه الحالة إلى سعة الموجة المنكسرة بـ A وإلى سعة الموجـة المنعكسة بـ B .

نود أن نحسب شدة الانعكاس في الحالتين المبينتين في الشكلين [٣٣-٦( أ )] و [ ٣٣ ٦ (ب) ] . نحن نعلم أنه إذا كانت الزاوية بين الحزمة المنعكسة والحزمة المتكسرة زاوية قائمة ، فإنه لن توجـد موجة منعكسة في الشكل [٣٣ - ٦ (ب)] ، ولكن سنسعى إلى أن نتبين فيما إذا كنا قادرين على أن نحصل على جواب عددي ، أي على عبارة صحيحة لـ B و لـ b بدلالة زاوية الورود i .

إن المبدأ الذي ينبغي علينا إدراكه هو المبدأ التالي . إن التيارات المتولدة في الزجاج تعطي موجتين فهي تعطي أولاً الموجة المنعكسة . أضف إلى ذلك أنه إذا لم تتولد تيارات في الزجاج ، فإن الموجة الواردة ستتابع طريقها فيه ، إذ ينبغي أن تتذكر أن كل المنابع في العالم تساهم في توليد الحقل المحصل . إن لمنبع الضوء الوارد سعة تساوي الوحدة ، وينتشر الضوء في الزجاج باتجاه الخط المنقط في الشكل . ولا يمكن مشاهدة هذا الحقل ، وعليه فإن التيارات التي تتولد في الزجاج يجب أن تولد حقلاً سعته (I —) ينتقل باتجاه الخط المنقط . سنحسب الآن باستخدام هذه الحقيقة سعة الموجة المنكسرة a وكذلك السعة A .

نرى من الشكل [ ٣٣ - ٦ ( أ ) ] أن الحقل ذا السعة b ينتج بفعل إشعاع الشحنات داخل الزجاج ، التي تستجيب لحقل a فيه ، وعليه فإن b متناسبة مع a . وبإمكاننا أن نفترض أنه لما كان الشكلان متماثلين تماماً ، باستثناء اتجاه الاستقطاب ، فإن النسبة B/A تكون مساوية للنسبة b/a . إن هذا غير صحيح تماماً ، ذلك لأن اتجاهات الاستقطاب في الشكل [ ٣٣ ٦ (ب) ] ليست متوازية جميعاً فيما بينها ، في حين أن ذلك نجده محققاً في الشكل [ ٣٣-٦ ( أ ) ] . والمركبة الفعالة لـ A هي المركبة العمودية على B فقط ، أي $A \cos (i + r)$ ، وهي المركبة التي تُنتج B . وعليه فإن التعبير الصحيح للتناسب هو :

$$\frac{b}{a} = \frac{B}{A \cos ( i + r )} \qquad (33-1)$$

والآن نلجأ إلى الحيلة . فنحن نعلم أن الحقل الكهربائي في الزجاج ، في كل من الوضعين ( أ ) و (ب) للشكل (٣٣ ٦) ، يولد اهتزازات للشحنات بحيث تعطي حقلاً مستقطباً في اتجاه مواز للشعاع الوارد سعته (1 −) ، ومتحركاً في اتجاه الخط المنقط . إلا أننا نرى من الجزء (ب) من الشكل أن مركبة A ، التي تتعامد مع الخط المنقط ، هي المركبة الوحيدة التي لها اتجاه الاستقطاب الصحيح الذي يولد هذا الحقل ، في حين أن السعة a بكاملهـا ، في الشكل [ ٣٣ - ٦ ( أ ) ] ، تسهم في ذلك ، وذلك لأن اتجاه استقطاب الموجة a مواز لاتجاه استقطاب الموجة ذات السعة (1−) . فبامكاننا إذن أن نكتب :

$$\frac{A \cos ( i - r )}{a} = \frac{-1}{-1} \qquad (33-2)$$

وذلك لأن كلا السعتين على يسار العلاقة (33-2) يولد موجة سعتهـا (1−) .

وبتقسيم العلاقة (1 - 33) على (2 — 33) نجد :

$$\frac{B}{b} = \frac{\cos (i + r)}{\cos (i - r)} \qquad (33-3)$$

وهي نتيجة بامكاننا أن نتحقق من صحتها بمقارنتها بنتائج نعلمها سابقاً . فإذا وضعنا $(i + r) = 90°$ فإن المعادلة (3 - 33) تعطي $B = 0$ ، وهو ما يقول به بروستر ، ولذا فإن نتائجنا حتى الآن تبدو غير خاطئة .

لقد افترضنا أن سعة الموجتين الواردتين مساوية الواحد ، وعليه فالنسبة $|B|^2/1^2$ تمثل عامل انعكاس الأمواج المستقطبة في مستوي الورود ، والنسبة $|b|^2/1^2$ تمثل عامل انعكاس الأمواج المستقطبة التي يكون اتجاه استقطابها عمودياً على مستوي الورود . وتتحدد نسبة هذين العاملين بالمعادلة (3 - 33) .

والآن نقوم بالمعجزة ، فلا نحسب النسبة فقط ، بل نحسب العاملين $|B|^2$ و $|b|^2$ كلاً على انفراد ! إننا نعلم من مبدأ انحفاظ الطاقة أن الطاقة في الموجة المنكسرة يجب أن تساوي الطاقة الواردة مطروحاً منها الطاقة التي تحملها الموجة المنعكسة ، وهي تساوي $1 - |B|^2$ في الحالة الأولى و $1 - |b|^2$ في الحالة الثانية . أضف إلى ذلك أن نسبة الطاقة التي تنفذ في الزجاج في الشكل [ ٣٣ - ٦ (ب)] إلى الطاقة النافذة من الزجاج في الشكل [ ٣٣ - ٦ ( أ ) ] هي كنسبة مربعي السعتين المنكسرتين أي كالنسبة $|A|^2/|a|^2$ . وقد يتساءل البعض عما إذا كنا نعلم فعلاً كيفية حساب الطاقة في الزجاج ، وذلك بسبب وجود طاقات تعود لحركة الذرات بالاضافة إلى طاقة الحقل . إلا أنه من الواضح أن كل المساهمات في الطاقة الكلية ستكون متناسبة مع مربع سعة الحقل الكهربائي . فلدينا إذن :

$$\frac{1 - |B|^2}{1 - |b|^2} = \frac{|A|^2}{|a|^2} \qquad (33-4)$$

نعوض الآن في المعـادلة (2 — 33) ، وذلك حتى نحذف A/a من العلاقة المذكورة أعلاه ، ونعبر عن B بدلالة b بفضل المعادلة (3 - 33) فنجد :

$$\frac{1-|b|^2\frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)}}{1-|b|^2}=\frac{1}{\cos^2(i-r)} \qquad (33-5)$$

وتحوي هذه المعادلة على سعة واحدة مجهولة هي b . فإذا حللناهـا للحصول على $|b|^2$ وجدنا :

$$|b|^2=\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \qquad (33-6)$$

وبالاستعانة بالمعادلة (3 — 33) نجد :

$$|B|^2=\frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \qquad (31-7)$$

وهكذا نكون قد أوجدنا عامل الانعكاس $|b|^2$ لموجة واردة مستقطبة باتجـاه عمودي على مستوي الورود ، وكذلك عامل الانعكاس $|B|^2$ لموجـــة واردة مستقطبة باتجاه واقع في مستوي الورود !

إن بإمكاننا أن نمضي في المناقشة بهذا الأسلوب ، فنبرهن على أن b حقيقية. ولـكي نجد ذلك ننظر في حالة يرد فيها الضوء من كلا الطرفين على سطح الزجاج ، وفي الوقت نفسه ، وهو وضع ليس من السهل تحقيقه تجريبياً ، إلا أنه من الطريف أن نعالجه نظرياً . فإذا حللنا هـذه الحالة العامة أمكننا أن نبرهن على أنــ b يجب أن تكون حقيقيـــة ، وأن b في الواقـع هي : $b=\pm\sin(i-r)/\sin(i+r)$ . بل إنه من الممكن أن نعين الاشارة فيما إذا نظرنا في طبقة رقيقة جداً يحصل فيهـا الانعكاس على سطحي الطبقة : الأمامي والخلفي ، فنحسب مقدار الضوء المنعكس . إننا نعلم مقدار الضوء الذي يجب

أن ينعكس على طبقة رقيقة ، ذلك لأننا نعلم مقدار التيار المتولد ، بل ولقد حسبنا الحقول التي تولدها هذه التيارات .

إن بامكان المرء أن يبرهن مستخدماً هذه الطريقة أن :

$$b = -\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \quad , \quad B = -\frac{\tan(i - r)}{\tan(i + r)} \qquad (33\text{-}8)$$

تسمى هاتان العلاقتان اللتان تعطيان عاملي الانعكاس بدلالة زاويتي الورود والانكسار بعلاقتي فْرِنِل في الانعكاس .

وإذا نظرنا فيما تؤول إليه هاتان العلاقتان ، عندما تسعى $i$ و $r$ إلى الصفر ، فإننا نجد في حالة الورود الناظمي أن : $B^2 \approx b^2 \approx (i - r)^2 / (i + r)^2$ وذلك في كلتي حالتيالاستقطاب ، إذ أن الجيوب تساوي الزوايا عملياً في هذه الحالة وكذلك الظلال . إلا أننا نعلم أن $\sin i / \sin r = n$، وأنه إذا كانت $i$ و $r$ صغيرتان ، فإن : $i / r \approx n$ ، ونرى أنه من السهل أن نبرهن على أن عاملي الانعكاس ، في حالة الورود الناظمي ، تكون :

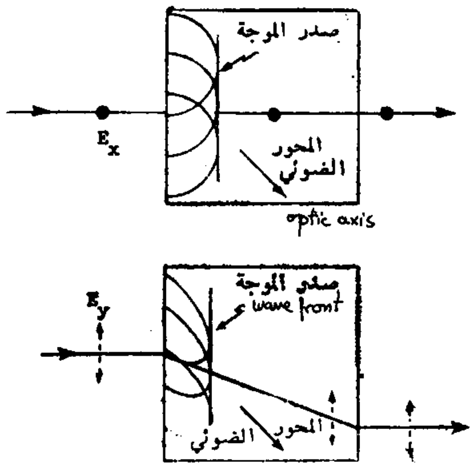
$$B^2 = b^2 = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

ومن الطريف أن نرى ما هي شدة الضوء المنعكس على سطح المـاء مثلاً في حالة الورود الناظمي . فقرينة انكسار الماء $n = 4/3$ ، وعليـه فإن عامل الانعكاس هو $(1/7)^2 \simeq 2\%$ . فلا ينعكس إذن إلا $2\%$ من الضوء على سطح الماء في حالة الورود الناظمي .

## ٣٣ ــ ٧ : الانكسار الشاذ Anomalous refraction

سندرس في نهاية الأمر حادثة استقطاب كانت بالفعـــل أول حادثة تم اكتشافها ألا وهي حادثة الانكسار الشاذ . فقد أحضر البحارة ، الذين زاروا

أيسلندا ، لدى عودتهم إلى أوروبا بلورات من سبار أيسلندا وهي مادة براقة سهلة الانشطار تركيبها الكيميائي $CaCO_3$ ، ولها خاصة طريفة هي أن أي شيء ينظر إليه من خلالها يبدو مضاعفاً ، فهي تشكل له خيالين . ولقد جاب هذا الأمر انتباه هايغنز الذي لعب دوراً هاماً في اكتشاف ظاهرة الاستقطاب. وكثيراً ما نجد أن أول الاكتشافات هو أصعبها تفسيراً . كما أننا لا نتمكن




الشكل (٣٣ - ٧)

يبين الشكل العلوي مسار شعاع اعتيادي عبر بلورة ذات انكسار مضاعف. وقد رسمنا الشعاع غير الاعتيادي في القسم السفلي من الشكل ، وفرضنا في كلا الشكلين أن المحور الضوئي واقع في مستوي الورقة .

من اختيار الظواهر التي توضع مفهوماً فيزيائياً إلا بعد فهم عميق لهذا المفهوم الفيزيائي .

ليست حادثة الانكسار الشاذ إلا ضرباً من حادثة الانكسار المضاعف التي أتينا على معالجتها فيما مضى . ويحصل الانكسار الشاذ عندما لا يكون المحور الضوئي ، الذي يتفق اتجاهه مع اتجاه المحور الطويل للجزيئات غير المتناظرة ، موازياً إلى سطح البلورة . ولقد رسمنا في الشكل (٣٣ - ٧) قطعتين من مادة

ذات انكسار مضاعف ، وقد بينا على الشكل اتجاه المحور الضوئي . وفي الشكل العلوي فرضنا أن الشعاع الوارد على المادة مستقطب خطياً ، وأن اتجاه استقطابه عمودي على المحور الضوئي للمادة . فإذا اصطدم هذا الشعاع بسطح المادة ، فإن كل نقطة من سطحها تعمل كمنبع لموجة تنتشر في البلورة بسرعة $v_\perp$ ، وهي سرعة انتشار الضوء في البلورة عندما يكون مستوي الاستقطاب عمودياً على المحور الضوئي . وليس صدر الموجة إلا مغلف المحلات الهندسية لهذه المويجات الكروية ، وينتقل صدر الموجة هذا في البلورة ، ويخرج من طرفها الثاني . وهذا هو السلوك الطبيعي الذي نتوقعه ، ولذا نسمي هذا الشعاع شعاعاً اعتيادياً .

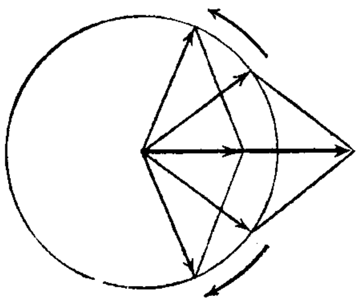
ولقد أدرنا اتجاه استقطاب الشعاع الوارد في الشكل السفلي بزاوية مقدارها °90 ، ولذا فإن المحور الضوئي واقع في مستوي الاستقطاب . فإذا تأملنا الآن في المويجات المتشكلة عند أية نقطة من سطح البلورة ، فإننا نرى أن هذه المويجات لا تنتشر على هيئة مويجات كروية . فالضوء الذي ينتشر في اتجاه المحور الضوئي ينتشر بسرعة هي $v_\perp$ ، ذلك لأن اتجاه الاستقطاب عمودي على اتجاه المحور الضوئي ، في حين أن الضوء المنتشر في اتجاه عمودي على المحور الضوئي ينتشر بسرعة نرمز لها بـ $v_\parallel$ ، وذلك لأن اتجاه الاستقطاب مواز لاتجاه المحور الضوئي. ولا تكون $v_\parallel$ مساوية $v_\perp$ في المادة ذات الانكسار المضاعف ، وتظهر $v_\parallel$ في الشكل أصغر من $v_\perp$ . وتشير الدراسة المفصلة إلى أن الأمواج تنتشر على سطح مجسم قطع ناقص ، محوره الكبير هو اتجاه المحور الضوئي . ويتقدم مغلف هذه المويجات الاهليلجية ، أي صدر الموجة ، في البلورة بالاتجاه الظاهر في الشكل . وينحرف الشعاع ثانية لدى خروجه من البلورة كما فعل لدى دخوله إليها ، بحيث يصدر موازياً لاتجاه الدخول ، إلا أنه يكون منزاحاً عنه .

وبالطبع فإن انكسار هذا الشعاع لا يخضع إلى قانون سنيل ، ولكنه يمضي في اتجاه غير اعتيادي ، ولذا فإننا نسميه شعاعاً غير اعتيادي ( شاذاً ) .

فإذا ورد شعاع غير مستقطب على بلورة تتمتع بخاصة الانكسار الشاذ ، فإن هذا الشعاع ينقسم إلى شعاع اعتيادي يسير في المادة بصورة ناظمية فيسلك بذلك سلوكاً اعتيادياً ، وإلى شعاع غير اعتيادي ينزاح عن طريق الشعاع الاعتيادي كلما مضى في البلورة . ويكون الشعاعان الصادران مستقطبين خطياً ، ويكون اتجاه استقطاب الشعاع الأول عمودياً على اتجاه استقطاب الشعاع الثاني. ويمكننا التحقق من ذلك بسهولة باستخدام صفيحة مقطبة نحلل بفضلها استقطاب كل من الشعاعين البارزين . وبامكاننا أيضاً أن نتحقق من سلامة تفسيرنا للحادثة بارسال ضوء مستقطب خطياً على البلورة . فإذا أحسنا اختيار اتجاه استقطاب الشعاع الوارد ، أمكننا جعل هذا الشعاع يسير في البلورة دون أن ينشطر ، كما يمكننا جعل هذا الشعاع يمر عبر البلورة دون أن ينشطر ولكن منزاحاً عن طريق انتشاره الأصلي .

لقد مثلنا في الشكلين (٣٣-١) و (٣٣-٢) حالات الاستقطاب المختلفة كحالتين خاصتين من حالات الاستقطاب هما على وجه التحديد استقطاب في الاتجاه x واستقطاب في الاتجاه y ، ولكن بمقادير مختلفة وأطوار متباينة . إن بامكاننا استخدام زوجين آخرين بدلاً منهما ، وسيفي هذان الزوجان الجديدان بالغرض كذلك . فقد نختار المحورين x′ و y′ المائلين على المحورين x و y [فيمكننا مثلاً النظر إلى أي استقطاب على أنه تركيب للحالتين ( أ ) و (هـ) في الشكل (٣٣ – ٢) ] . إلا أنه من الطريف أن نرى أن بالامكان تعميم هذه الفكرة على حالات أخرى أيضاً . فبامكاننا مثلاً النظر إلى أي استقطاب خطي على أنه تركيب لاستقطابين دائريين ، أحدهما يميني والآخر

يساري ، إذا أحسنا اختيار سعة هذين الاستقطابين الدائريين ، و كذلك زاوية الطور بينهما . [وذلك ما يوضحه الرسمان (ح) و (ز) في الشكل (٣٣-٢)]، وذلك لأن إضافة شعاعين متساويين ، يدوران باتجاهين متعاكسين ، يعطي شعاعاً وحيداً يهتز على خط مستقيم ، وهذا ما يظهر في الشكل (٣٣ – ٨) .

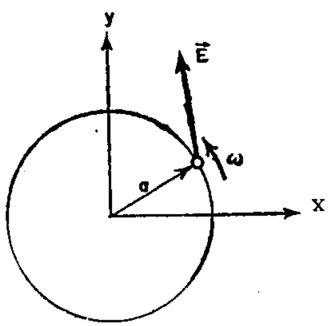


الشكل (٣٣ – ٨)

إذا جمعنا متجهتين تدوران في اتجاهين متعاكسين ، ولهما سعة واحدة ، فإن حاصل جمعهما هي متجهة ذات اتجاه ثابت وسعة متغيرة .

وإذا حصل انزياح في طور أحد الشعاعين ، أدى ذلك إلى ميل الخط الناتج . فبامكاننا إذن أن نعتبر جميع الصور في الشكل (٣٣-١) بأنها « تركيب مقادير متساوية من ضوء مستقطب دائري يميني ويساري ، وبزوايا طور مختلفة » . وعندما يتأخر طور الاهتزازة اليسارية عن الاهتزازة اليمينية ، فان اتجاه الاستقطاب الخطي يتغير . وعليه فإن المواد التي لها فعالية ضوئية هي مواد ذات انكسار مضاعف . ويمكننا أن نصف خواصها بأن لها قرائن انكسار مختلفة بالنسبة للضوء المستقطب دائرياً ، وذلك حسبما يكون هذا الضوء مستقطباً يمينياً أو يسارياً . ويعطي جمع ضوأين مستقطبين دائرياً ، أحدهما يميني والآخر يساري ، وبشدتين مختلفتين ، ضوءاً مستقطباً اهليلجياً .

وللضوء المستقطب دائرياً خاصة أخرى هامة ، فهو يحمل اندفاعاً زاوياً ( حول اتجاه الانتشار ) . ولتوضيح ذلك دعنا نفترض أن ضوءاً من هذا النوع يرد على ذرة نمثلها بهزازة توافقية نستطيع إزاحتها في أي اتجاه نشاء في المستوي xy . فانزياح الالكترون في الاتجاه x سيستجيب لمركبة الحقل في الاتجاه x أي إلى المركبة $E_x$ ، في حين يستجيب الانزياح في الاتجاه y إلى المركبة $E_y$ ، المساوية للمركبة $E_x$ في الشدة ، والمتخلفة عنها بالطور بزاوية مقدارها 90° . فالالكترون إذن يتحرك في دائرة بسرعة زاوية ω ، وذلك بفعل الحقل الكهربائي الدوّار للضوء ، وهذا ما يوضحه الشكل (٣٣-٩) . إن اتجاه الانتقال a للالكترون ،




الشكل (٣٣ - ٩)
شحنة تتحرك على دائرة بفعل استجابتها لضوء مستقطب دائرياً

واتجاه القوة الكهربائية $q_e E$ التي تفعل فيه ، متعلقان بخواص التخامد في استجابة الهزازة ، وعليه فليس من الضروري أن ينطبق الاتجاهان السابقان ، ولكنهما يدوران معاً في آن واحد . ومن الممكن أن تكون لـ E مركبة عمودية على a ، وبالتالي فان عملاً ما يُنفق على الجملة ، وينتج بسبب هذا العمل عزم τ . ويكون العمل المبذول في الثانية الواحدة مساوياً إلى τω . وتكون

الطاقة الممتصة خلال زمن دور واحد $T$ مساوية إلى $\tau\omega T$ ، ويكون $\tau T$ الاندفاع الزاوي الذي تتلقاه المادة التي تمتص الطاقة . وهكذا فإننا نرى أن شعاعاً من الضوء المستقطب دائرياً ، حاوياً على طاقة كلية $\mathcal{E}$ ، يحمل اندفاعاً زاوياً ( ويكون اتجاه متجهة الاندفاع الزاوي متفقاً مع اتجاه الانتشار ) ، وتكون قيمة هذا الاندفاع هي $\mathcal{E}/\omega$ . فإذا حصل امتصاص لهذا الشعاع ، فإن هذا الاندفاع الزاوي ينتقل إلى المادة الماصة . ويحمل الضوء المستقطب دائرياً ، والذي يكون استقطابه الدائري يسارياً ، اندفاعاً زاوياً له إشارة معاكسة أي $-\mathcal{E}/\omega$ .

★ ★ ★

## مسائل وتمارين

٣٣-١ : توضع لوحتان مقطّبتان بحيث يتعامد محوراهما. ثم توضع لوحة ثالثة بينهما بحيث يميل محورها بزاوية $\theta$ على المقطب الأول . ما هي شدة الإشعاع النافذ من المجموعة ، وذلك إذا افترضنا أن المقطبات الثلاث مثالية ، أي أنه لا ضياع فيها ؟

٣٣-٢ : نفترض أنه إذا وردت حزمة من ضوء مستقطب استقطاباً مستوياً على مقطب ، فإن جزءاً مقداره $\alpha^2$ من الشدة ينفذ إذا كان محور المقطب موازياً لاتجاه محور الاستقطاب ، وأن جزءاً مقداره $\varepsilon^2$ ينفذ عندما يكون المحوران متعامدين . ( إذا كان المقطب مثالياً فإن $\alpha^2 = 1$ , $\varepsilon^2 = 0$ ) . يرد ضوء غير مستقطب شدته $I_0$ ، بصورة ناظمية على مقطبين ، يميل محور أحدهما على محور الآخر بزاوية $\theta$ . فما هي شدة الضوء النافذ ؟ ( نهمل الآثار الناتجة عن الانعكاس ) .

٣٣-٣ : برهن أن زاوية بروستر ( وهي زاوية الورود i التي يكون من أجلها الضوء المنعكس مستقطباً خطياً ) تحقق العلاقة : $\tan i = n$ .

٣٣-٤ : ناقش شدة الاشعاع الصادر عن الكترون متحرك بسرعة ثابتة في مسار دائري ، واستقطاب هذا الاشعاع ، وذلك فيما يتعلق بالنقاط الواقعة (أ) على محور الدائرة و (ب) في مستوي الدائرة .

٣٣-٥ : تساوي قرينتا انكسار الكوارتز المتبلور من أجل الضوء ذي طول الموجة $600\ m\mu$ المقدارين $n_0 = 1.544$ و $n_e = 1.553$ ، وذلك بالنسبة للشعاع الاعتيادي والشعاع غير الاعتيادي على الترتيب. فإذا قطعت بلورة كوارتز ، في اتجاه مواز لمحورها الضوئي ، فإن بامكان المرء أن يستفيد من الفرق الأعظمي بين سرعتي الشعاعين العادي وغير العادي لدى مرورهما بصورة ناظمية في البلورة . أوجد ثخن البلورة التي تجعل فرق الصفحة بين الشعاعين مساوياً $90°$ ، وذلك عند استخدام الضوء ذي طول الموجة المذكور أعلاه .

٣٣-٦ : يتنزه طالب في السنة الاعدادية ، من معهد ( كالتك ) ، أثناء عطلته الصيفية ، مع زميلته في الدراسة ، فيرى في بحيرة هادئة خيال القمر الذي يكون مرتفعاً فوق الأفق بمقدار $10°$ . فيحن إلى الفصل الثالث والثلاثين حنيناً يدفعه إلى حساب شدة لمعان الخيال ومقارنته بشدة لمعان ضوء القمر نفسه . ويفترض ، في هذا الحساب ، ان الاشعاع الصادر عن القمر غير مستقطب ( تقريباً ) . فما هي النتيجة التي يتوقع أن يجدها ؟ برهن أن الشدة المنعكسة ، في اتجاه الورود المماسي ، تقترب من مائة بالمائة .

٣٣-٧ : إذا سقط الضوء عمودياً على سطح صغير ومستو من الماس الذي قرينة انكساره $n = 2.40$ ، فالمطلوب ( أ ) ما هي نسبة الاشعاع المنعكس إلى الاشعاع الوارد ؟ (ب) ما هي زاوية بروستر في الماس ؟

٣٣-٨ : نفترض في المسألة الخامسة أن قرينتي انكسار الضوء ، ذي طول الموجة 410 ميلي ميكرون ، هما $n_0 = 1.557$ و $n_e = 1.567$ ، وأن بلورة الكوارتز قد قطعت بحيث تؤلف صفيحة ربع موجية

بالنسبة للضوء ذي طول الموجة 600 ميلي ميكرون . صف بالتفصيل حالة استقطاب الضوء الصادر في حالة استخدام الضوء قصير طول الموجة إذا كان هذا الضوء مستقطباً خطياً قبل دخوله إلى البلورة .

٩-٣٣ : تُعطى صفيحة مصقولة من زجاج بركاني أسود ، ويُطلب منك قياس قرينة انكسار مادتها . فماذا عساك تفعل ؟ وما هي الدقة التي تتوقع أن تجدها ؟

★ ★ ★

# الفصل الرابع والثلاثون

# الظواهر النسبوية في الاشعاع

Relativistic effects in Radiation

## ٣٤ ــ ١ : المنابع المتحركة Moving Sources

سنبحث في هذا الفصل عن عدد من الآثار المختلفة المتعلقة بالاشعاع وننهي بذلك عرض النظرية الكلاسيكية في انتشار الضوء . لقد كان تحليل الظواهر الضوئية الذي قدمناه في الفصول السابقة مفصلاً وشاملاً إلى حد بعيد . والظواهر الهامة الوحيدة ، المرتبطة بالاشعاع الكهرطيسي ، التي لم نتعرض لها هي سلوك أمواج الراديو في صندوق ، ذي جدران عاكسة ، أبعاده من مرتبة طول الموجة ، وكذلك سلوكها عند انتشارها عبر أنبوب طويل . أما الظواهر الناشئة في ما يسمى المجاوباب ذات الجوف و دليلات الأمواج فسوف نناقشها فيما بعد ، علماً بأننا سنوضحها أولاً بمثال فيزيائي آخر هو الصوت . وفيما عدا ذلك فإن دراسة النظرية الكلاسيكية للضوء تنتهي بهذا الفصل .

إن الشيء المميز لكافة الآثار التي سنتحدث عنها هنا هو أنها مرتبطة بالمنابع المتحركة . فلن نفترض بعد الآن أن انزياح المنبع طفيف وأن حركته تحدث بسرعة صغيرة نسبياً حول نقطة ثابتة . ولنتذكر أنه وفقاً لقوانين

الالكتروديناميك الأساسية يعطى الحقل الكهربائي على مسافات كبيرة من الشحنة المتحركة بالصيغة :

$$\mathbf{E} = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 c^2} \cdot \frac{d^2 \mathbf{e}_{R'}}{dt^2} \qquad (34-1)$$

والمقدار المحدّد لـ $\mathbf{E}$ هنا هو المشتق الثاني لمتجهة الوحدة $\mathbf{e}_{R'}$ الموجهة نحو الموضع الظاهري للشحنة . وبطبيعة الحال فإن متجهة الوحدة لا تتجه إلى موضع الشحنة في اللحظة الزمنية المعتبرة ، بل إلى ذلك المكان الذي كان من الممكن أن تكون الشحنة فيه إذا كانت سرعة انتقال المعلومات من الشحنة إلى الراصد سرعة محدودة c .

وينشأ مع الحقل الكهربائي حقل مغناطيسي معامد دوماً للحقل الكهربائي وللمنحى الظاهري للشحنة ، وهو يعطى بالصيغة :

$$\mathbf{B} = -\mathbf{e}_{R'} \times \frac{\mathbf{E}}{c} \qquad (34-2)$$

لقد درسنا حتى الآن حالة السرع اللانسبوية وفي هذه الحالة يمكن إهمال الحركة باتجاه المنبع . لنعتبر الآن الحالة العامة، حالة السرع الاختيارية، ولننظر في الآثار التي تنشأ في هذه الشروط . لنفترض إذن أن سرعة الحركة اختيارية وأن المسافة بين الكاشف والمنبع كبيرة جداً كما في السابق .

قلنا في الفصل الثامن والعشرون إنه لا يدخل في عبارة المشتق $d^2\mathbf{e}_{R'}/dt^2$ سوى تغير منحى $\mathbf{e}_{R'}$ . لتكن الشحنة موجودة في نقطة إحداثياتها (x, y, z) وليكن المحور oz منطبقاً على خط الراصد ، كما في الشكل (٣٤-١) . ففي اللحظة الزمنية المعتبرة τ تكون إحداثيات الشحنة هي $x(\tau)$ , $y(\tau)$ , $z(\tau)$ . والمسافة R تساوي بدقة كبيرة $R(\tau) = R_0 + z(\tau)$ . يتوقف منحى المتجهة $\mathbf{e}_{R'}$

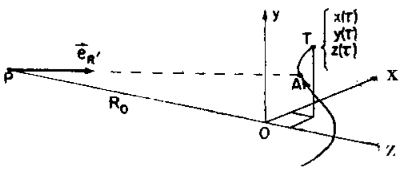
توقفاً رئيسياً على x و y ويكاد لا يتوقف أبداً على z . إن المركبتين العرضيتين لمتجهة الوحدة تساويان $\frac{x}{R}$ و $\frac{y}{R}$ ونحصل بمفاضلتهما على حدين فيهما $R^2$ في المخرج :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{x}{R}\right) = \frac{dx/dt}{R} - \frac{dz}{dt}\frac{x}{R^2}$$

وعلى هذا فإنه على مسافات كبيرة كبراً كافياً يكون الحدان الحاويان على مشتقي x و y هما فقط المهمان . ومن هنا نجد :

$$E_x = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 c^2 R_0}\frac{d^2 x'}{dt^2} ,$$

$$E_y = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 c^2 R_0}\frac{d^2 y'}{dt^2} \qquad (34-3)$$




الشكل (٣٤ - ١)

محرك الشحنة المتحركة . إن الموضع الحقيقي في اللحظة τ هو T
أما الموضع الموافق للتأخر فهو A .

حيث تساوي $R_0$ المسافة إلى الشحنة q تقريباً . لنعرّف $R_0$ بأنها المسافة OP إلى مبدأ الإحداثيات (x, y, z) . وهكذا فإن الحقل الكهربائي يساوي مقداراً ثابتاً مضروباً بمقدار بسيط جداً وهو مشتق الاحداثيين x و y بالنسبة

إلى الزمن t ( يمكن رياضياً تسميتها المركبتين العرضيتين لمتجهة موضع الشحنة r ولكن هذا لا يزيد الوضوح ) .

وعلينا بالطبع أن نتذكر دوماً أن الإحداثيات لا تؤخذ في لحظة الرصد بل مع حسبان التأخر . وفي الحالة الراهنة يتوقف التأخر على (τ) z أيضاً . فما قيمة زمن التأخر هذا ؟ لنرمز بـ t إلى لحظة الرصد ( مأخوذة في نقطة الرصد P ) فلا تكون اللحظة τ المقابلة في النقطة A للحظة t منطبقة عندئذ على t بل تتأخر عنها بالفاصل الزمني اللازم للضوء كي يقطع المسافة من الشحنة إلى نقطة الرصد . ويساوي هذا التأخر ، بتقريب أول ، $\frac{R_0}{c}$ أي مقداراً ثابتاً ( وليس لهذا شأن كبير ) . ولكنه يجب أن يتوقف في التقريب الثاني على الإحداثي z في اللحظة τ إذ لو كانت q منزاحة إلى الوراء بعض الشيء لازداد التأخر قليلاً . ولقد أهملنا في السابق هذا الأثر فإذا أدخلناه الآن في الاعتبار حصلنا على نتائج صحيحة مهما كانت السرع .

إن ما يجب فعله الآن هو انتخاب قيمة ما لـ t لحساب τ منها ثم إيجاد x و y في هذه اللحظة τ أي x و y المتأخرين اللذين سنرمز إليهما بـ x′ و y′ ، وهما اللذان يعين مشتقاهما الثانيان الحقل E . وعلى هذا يتعين τ من المساواة :

$$t = \tau + \frac{R_0}{c} + \frac{z(\tau)}{c} \quad \text{و}$$

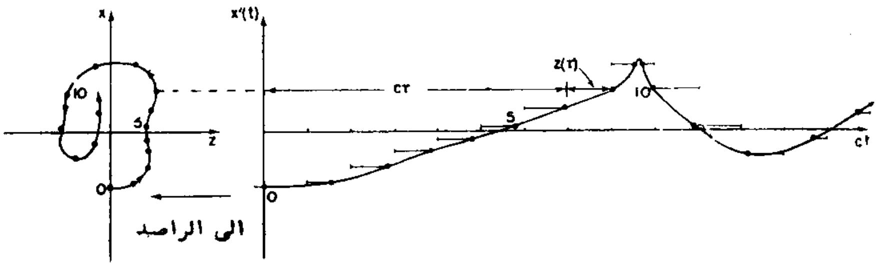
$$x'(t) = x(\tau) \quad , \quad y(t) = y(\tau) \qquad (34-4)$$

إن هذه المعادلات معقدة إلا أنه من السهل ، إلى حد ما ، إيجاد شكل هندسي يصف حلها . ويعطينا هذا الشكل شعوراً كيفياً جيداً عن سير الأمور في حين أن استخراج النتائج الدقيقة لهذه المسألة المعقدة يتطلب الكثير من الحسابات المفصلة .

يمكن تبسيط المعادلة السابقة تبسيطاً ممتعاً . لنسقط من حسابنا ثابتة التأخر $\frac{R_0}{c}$ غير المهمة فهذا لا يعني أكثر من ضرورة تغيير مبدأ الزمن بقدر ثابت . فنجد عندئذ :

$$ct = c\tau + z(\tau) \quad و \quad x' = x(\tau) \quad و \quad y' = y(\tau) \qquad (34-5)$$

ويهمنا الآن إيجاد $x'$ و $y'$ كتابعين لـ t وليس لـ τ ونستطيع ذلك كما يلي . تشير المعادلة ( 5 - 34 ) إلى وجوب أخذ الحركة الحقيقية واضافة τ مضروباً بثابت ( يساوي سرعة الضوء ) . ويبين الشكل (٣٤ — ٢) معنى هذا الكلام




الشكل ( ٣٤ - ٢ )

الحل الهندسي للمعادلة ( 5 - 34 ) لإيجاد $x'(t)$

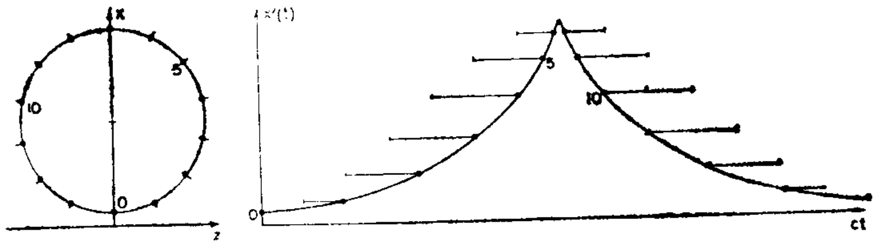
حيث نأخذ الحركة الحقيقية للشحنة ( المبينة إلى اليسار ) ونتصور أنه في أثناء حركتها هذه تبتعد عن النقطة P بالسرعة c ( ليس هناك أي تقلصات نسبوية أو أشياء من هذا القبيل كل ما في الأمر هو اضافة رياضية للحد cτ ) . فنحصل هكذا على حركة جديدة يكون فيها احداثي خط النظر هو ct كما هو مبين الى يمين الشكل . ( يبين الشكل حالة حركة مستوية معقدة نوعاً ما الا أن الحركة

يمكن ، بالطبع ، ألا تحدث في المستوي ) . ان مغزى هـذه العملية هو أن المسافة الأفقية ( أي خط النظر ) لم تعد مساوية z بل z + cτ وبالتالي ct . وبهذه الكيفية نكون قـد وجدنا صورة منحني تغير x′ ( و y′ ) بدلالة t ! بقي علينا تعيين التسارع على هذا المنحني أي مفاضلته مرتين . من هنا نستنتج أخيراً أنه لإيجاد الحقل الكهربائي للشحنة المتحركة ينبغي أخـــذ تحرك الحركة وابعاد كل نقطة منه عن نقطة الرصد بالسرعة c « فينبسط المحرك بذلك » . يعطي المنحني المرسوم على هذا النحو x′ و y′ بدلالة t بينما يعطي التسارع على هذا المنحني الحقل الكهربائي بتبعية الزمن t . وفي وسعنا ، اذا شئنا ، أن نتصور أن هذا المنحني يتحرك بكامله الى الأمام دون تشوه بالسرعة c عبر مستوي النظر بحيث يكون x′ و y′ إحداثيي نقطة تقاطعه مع مستوي النظر . فيعطي تسارع هذه النقطة الحقل الكهربائي . إن دقة هـذا الحل مساوية لدقة المعادلة التي انطلقنا منها فهو مجرد تمثيل هندسي لها .

إذا كانت الحركة بطيئة نسبياً كحركة هزاز مثلاً يهتز ببطء الى الأعلى و الأسفل فإننا نحصل من قذفها بعيداً بسرعة الضوء على منحن جيبي بسيط و يعطينا هذا الصيغة التي صادفناها مراراً وهي صيغة الحقل المتولد من شحنة مهتزة . وهناك مثال أكثر أهمية وهو الالكترون المتحرك على محيط دائرة بسرعة قريبة جداً من سرعة الضوء . فإذا نظرنا في مستوي الدائرة بدت لنا x′(t) المتأخرة كما هو ظاهر على الشكل ( ٣٤ – ٣ ) . فما هذا المنحني ؟ إذا تصورنا نصف القطر المتجه من مركز الدائرة الى الشحنة ومددنا هذا الخط القطري قليلاً جداً الى ما وراء الشحنة ( بمقدار زهيد للغاية إذا كانت حركة الشحنة سريعة ) بلغنا نقطة على هذا الخط تتحرك بسرعة الضوء . ولهذا فإنه عندما نبعد هذه الحركة بسرعة الضوء تكون الحركة الناجمة مماثلة لحركة شحنة ثبتت على دولاب يتدحرج ( دون انزلاق ) بالسرعة c . وهكذا نجد منحنياً يشبه السيكلوئيد كثيراً ويسمى « تحت السكلوئيد » .

hypocycloid

وعندما تتحرك الشحنة على محيط الدائرة بسرعة قريبة جداً من سرعة الضوء تغدو « ذرى » المنحني حادة جداً . فإذا أصبحت السرعة مساوية بالضبط لسرعة الضوء صارت الذرى لا متناهية الحدّة . والعبارة « لا متناهية الحدة » مثيرة للاهتمام إذ تعني أن المشتق الثاني كبير جـداً بجوار الذروة . فنحصل في كل دورة على نبضة حادة للحقل الكهربائي . وما كنا لنحصل على شيء من هذا لو أن الحركة لا نسبوية، إذ كلما دارت الشحنة عندئذ دورة تولدت اهتزازة لها نفس « الشدة » تقريباً طوال مدة الدورة . وعوضاً عن هذا تنشأ في حالة السرع الكبيرة




الشكل ( ٣٤-٣ )

منحني تغيرات $x'(t)$ لجسيم يتحرك على محيط دائرة بسرعة ثابتة $v = 0.94\ c$

نبضات حادة جداً للحقل الكهربائي تتكرر بفواصل زمنية مساوية $T_0$ حيث $T_0$ هو الدور (أي زمن الدورة الواحدة). وتنتشر هذه الحقول الكهربائية القوية في مخروط ضيق حول منحى حركة الشحنة . وعندما تبتعد الشحنة عن نقطة الرصد P يكون تقوس المنحني ضعيفاً جداً وكذلك الاشعاع الصادر باتجاه P .

## ٣٤ ـــ ٣ : اشعاع السنكروترون Synchrotron radiation

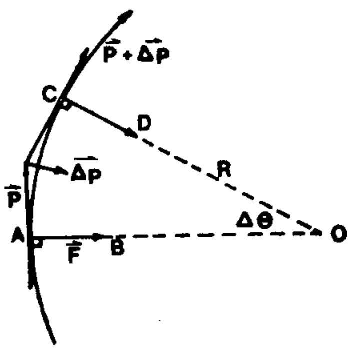
تتحرك الالكترونات السريعة في السنكروترون على محارك دائرية بسرعة

قريبة من c . ويمكن رؤية الاشعاع المذكور كضوء فعلي. لنناقش هذا الأمر بتفصيل أكثر .

تدور الالكترونات في السنكروترون في حقل مغناطيسي منتظم . لنبحث أولاً سبب حركتها على دوائر . إن القوة المؤثرة في جسم موجود في حقل مغناطيسي تساوي ، كما نعلم من المعادلة (10—12) :

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{v} \times \mathbf{B} \qquad (34-6)$$

وهي تعامد كلًا من الحقل والسرعة . وتساوي القوة ، كالمعتاد ، معدل تغير الاندفاع مع الزمن . فإذا كان الحقل موجهاً نحو الأعلى بحيث يبتعد عن صفحة هذا الكتاب كان اندفاع الجسم والقوة المطبقة عليه كما هو مبين على الشكل (٣٤ - ٤) . وبما أن القوة تعامد السرعة فإن الطاقة الحركية وبالتالي القيمة العددية للسرعة تبقيان ثابتتين . ويؤول تأثير الحقل المغناطيسي إلى تغيير




الشكل (٣٤-٤)
يتحرك الجسم المشحون في حقل مغناطيسي
منتظم على محرك دائري ( أو لولبي )

منحى الحركة . وفي خلال الزمن القصير $\Delta t$ تتغير متجهـــة الاندفاع بالمقدار $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{F} . \Delta t$ الموجّه عمودياً على الاندفاع فتدور نتيجة لذلك المتجهة $\mathbf{p}$ بالزاوية $\Delta\theta = \Delta p/p = qvB\Delta t/p$ لأن $|F| = qvB$ . بيد أن الجسيم يكون في خلال نفس هذا الزمن قـد قطع المسافة $\Delta s = v \Delta t$ ويتقاطع المستقيمان AB و CD ، وضوحـاً ، في النقطـة O ويكون $OA = OC = R$ حيث $\Delta s = R \Delta\theta$ . وبدمج هذه المعادلات نجد $R\Delta\theta/\Delta t = R\omega = v = qvBR/p$ ونستخلص منها :

$$p = qBR \tag{34-7}$$

و :

$$\omega = qvB/p \tag{34-8}$$

وبما أننا نستطيـع تكرار هذه المحاكمات في لحظات الزمن التالية فإننا نـستنتج أن الجسيم يجب أن يتحرك على محيط دائرة نصف قطرها R بالسرعة الزاوية $\omega$ .

تعبر مساواة الاندفاع لجداء الشحنة في نصف القطر في الحقـل المغناطيسي عن قانون مهم جداً ذي تطبيقات كثيرة . فهو مهم عملياً لأن مراقبة حركة جسيمات متساوية الشحنة في حقل مغناطيسي وقياس أنصاف أقطار تقوس مداراتها تسمح بتعيين اندفاعاتها متى علم الحقل المغناطيسي . وإذا ضربنا طرفي المعـادلة (7 - 34) بـ c وعبّرنا عن q بدلالة شحنـة الالكترون $q_e$ ، أمكننا قياس الاندفاع بالالكترون – فولت . وفي هذه الوحدات تغدو صيغتنا بالشكل :

$$pc\ (ev) = 3 \times 10^8 \frac{q}{q_e} BR \tag{34-9}$$

حيث نعبر عن B و R وسرعة الضوء بوحدات الجملة الدولية SI وفي هـذه الجملة تساوي c عددياً $3 \times 10^8$ .

إن وحدة التحريض المغناطيسي في الجملة الدولية هي التسلا ( فيبر/متر مربع ) وهناك وحدة أقدم من هذه وما زالت شائعة الاستعمال وهي الغوس . والفيبر/م٢ يساوي $10^4$ غوس . ولإعطاء فكرة عن قيم الحقول المغناطيسية نذكر أن أشد حقل مغناطيسي يمكن عادة توليده في الحديد هو $1.5 \times 10^4$ غوس تقريباً . وإذا أريد الحصول على حقول أشد لم يعد هناك ميزة في استخدام الحديد . وفي الوقت الحاضر تستطيع المغانط الكهربائية ذات الملفات المصنوعة من سلك مفرط الناقلية توليد حقول مغناطيسية مستقرة تفوق شدتها $10^5$ غوس أي عشر وحدات دولية . هذا وإن شدة الحقل المغناطيسي الأرضي عند خط الاستواء هي بضعة أعشار الغوس .

لنعد ثانية الى المعادلة (9 – 34) ولنتخيل سنكروترونا يسرّع الجسيمات الى مليار الكترون فولت أي أن pc يساوي $10^9$ ( سنعود ثانية الى الطاقة بعد قليل ) . فإذا كان B مساوياً $10^4$ غوس مثلاً ، وهو حقل حسن الشدة فهي تساوي وحدة دولية واحدة ، وجدنا أن R تساوي 3.3 متر . إن نصف قطر سنكروترون معهد كاليفورنيا التكنولوجي هو 3.7 متر والحقل هناك أشد بقليل والطاقة هي 1.5 مليار (الكترون - فولت) ولكن الفكرة تبقى واحدة . إننا ندرك الآن سرّ إعطاء السنكروترونات تلك الأبعاد .

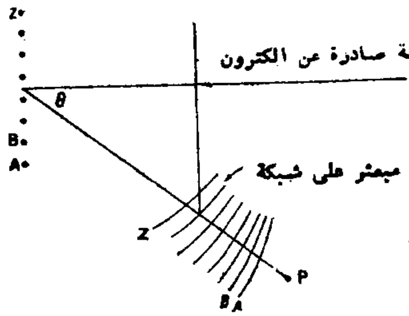
لقد حسبنا اندفاع الجسيم بيد أننا نعلم أن الطاقة الكلية ، بما في ذلك طاقة السكون ، تعطى بالعلاقة $W = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$ . وفي حالة الالكترون تكون طاقة السكون $mc^2$ مساوية $0.511 \times 10^6\,ev$ فيمكن إغفالها عندما يكون $pc = 10^9\,ev$ واستخدام المساواة $W = pc$ في كافة الأغراض العملية اذا كانت السرع نسبوية . وليس هناك أي فرق ، عملياً ، بين القول ان طاقة الالكترون هي مليار الكترون فولت والقول ان جداء الاندفاع في c يساوي

مليار الكترون فولت. ومن السهل أن نبين أنه اذا كان $W = 10^9 ev$ فإن سرعة الالكترونات لا تختلف عن سرعة الضوء الا بجزء من ثمانية ملايين !

لنعد الآن الى الاشعاع الصادر عن جسيم كهذا . ان الجسيم المتحرك على دائرة نصف قطرها 3.3 متر ، أي محيطها عشرون متراً ، يقوم بدورة في خلال الزمن اللازم تقريباً كي يقطع الضوء مسافة عشرين متراً . ولهذا فإن طول موجة الاشعاع الصادر يساوي ، كما قد يتبادر للذهن ، 20 متراً أي يقع في منطقة أمواج الراديو القصيرة . إلا أنه تنشأ كما ذكرنا ذرى الشكل (٣٤-٣) وبسبب كون المسافة التي يجب إضافتها الى نصف القطر لبلوغ السرعة c تساوي جزءاً من ثمانية ملايين من نصف القطر فإن الذرى تكون حادة جداً بمقارنتها مع المسافة فيما بينها . ويؤدي التسارع الذي يتعين بالمشتق الثاني بالنسبة الى الزمن الى ظهور « عامل انضغاط » قدره $(8 \times 10^6)^2$ ذلك أن سلم الزمن يصغر $8 \times 10^6$ مرة في جوار الذرى وهو يدخل مرتين . ولهذا يمكن أن نتوقع أن يكون الطول الموجي الفعال أقصر بكثير ، كأن يكون أقصر من 20 متراً بـ $64 \times 10^{12}$ مرة فيقع حينئذ في منطقة الأشعة السينية . (وفي الحقيقة فإن الذروة نفسها ليست العامل المحدّد الكلي ويجب إدخال منطقة معيّنة حولها ويؤدي هذا الى الأس 3/2 عوضاً عن التربيع ولكنه مع ذلك لا يوصلنا الى المنطقة المرئية) وهكذا فإنه حتى لو شع الالكترون المتحرك ببطء أمواجاً راديوية طولها من مرتبة عشرين متراً فإن الآثار النسبوية تقلص طول الموجة الى درجة تجعل الاشعاع مرئياً . ومن الواضح أن هذا الضوء يجب أن يكون مستقطباً بحيث يكون الحقل الكهربائي معامداً للحقل المغناطيسي المنتظم .

ولكي نقدر علاوة على ذلك ما قد نشاهده ، نفترض أننا وجهنا ضوءاً كهذا على شبكة انعراج مؤلفة من عدد كبير من الأسلاك الناثرة ( بما أن هذه النبضات

متباعدة زمنياً بعضاً عن بعض فإننا ، للتبسيط ، سنأخذ نبضة واحدة فقط ) . فماذا نرى بعد ارتداد هذه النبضة عن الشبكة ؟ ( يجب أن نرى ضوءاً أحمر وأصفر الخ ان كنا سنرى ضوءاً ما ) . فماذا نرى فعلاً ؟ تسقط النبضة مباشرة على الشبكة فتبدأ جميع الهزازات في الشبكة بالاهتزاز معاً وبعنف محدثة آثارها في مختلف المناحي كما هو مبين على الشكل ( ٣٤ - ٥ ) . الا أن النقطة P أقرب




الشكل ( ٣٤ - ٥ )

الضوء الساقط على الشبكة على هيئة نبضة حادة يتبعثر على الشبكة في شتى المناحي بألوان مختلفة

الى احدى نهايتي الشبكة منها الى الأخرى بحيث أن الحقل الكهربائي للنبضة يصل الى هذه النقطة من السلك A أولاً ثم من B وهكذا الى أن تصل النبضة في النهاية من السلك الاخير . وباختصار يكون مجموع الانعكاسات من كافة الاسلاك المتتابعة كما هو مبين على الشكل [ ٣٤-٦ ( أ ) ] . وهو حقل كهربائي



( أ )　　　　　　　　　　( ب )

الشكل ( ٣٤-٦ )

الحقل الكهربائي الكلي الناجم عن سلسلة من ( أ ) النبضات الحادة و ( ب ) النبضات الملساء
Smooth pulses　　Sharp　　Series

مكوّن من سلسلة نبضات ويشبه إلى حد بعيد موجة جيبية يساوي طولها الموجي المسافة بين هذه النبضات ، تماماً كما يمكن أن يحدث فيما لو سقط على الشبكة ضوء وحيد اللون . وعلى هذا فإننا نحصل على ضوء ملون فعلاً . وقد يجول في الخاطر ، استناداً إلى هذا البرهان نفسه ، أننا سنحصل على الضوء من أي نوع من «النبضات» . ولكن لا : لنفترض أن الذرى كانت ملساء جداً ولنجمع معاً كافة النبضات المتبعثرة والتي تفصلها أزمنة قصيرة كما في الشكل [٣٤-٦ (ب)]. نرى عندئذ أن الحقل لا يهتز أبداً ويمكن تمثيله بمنحن أملس تماماً إذ إن كل نبضة لا تتغير كثيراً في خلال الفاصل الزمني بين النبضات .

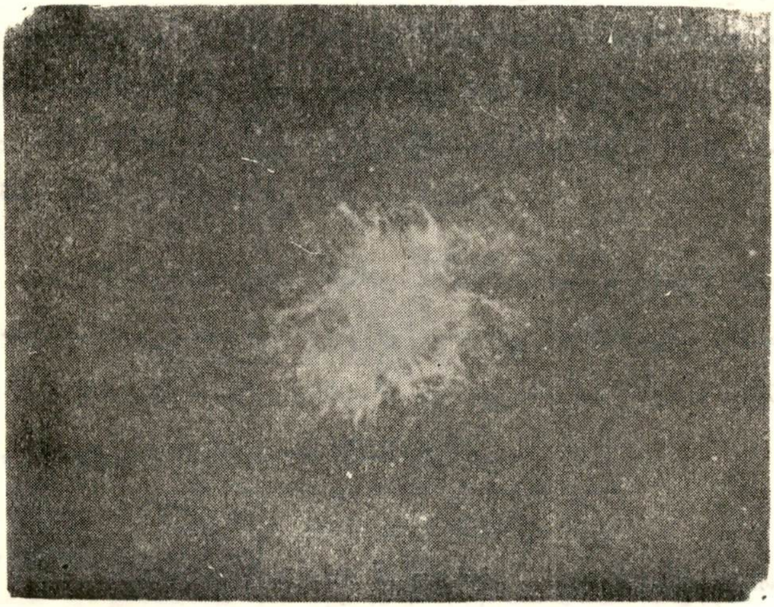
يسمى الإشعاع الكهرطيسي الصادر عن جسيمات نسبوية مشحونة تدور في حقل مغناطيسي إشعاع السنكروترون . وقد سمي كذلك لأسباب واضحة إلا أنه لا يقتصر على السنكروترونات أو حتى على المختبرات الأرضية . وإنه لأمر مثير ومشوّق أن يحدث هذا الإشعاع في الطبيعة .

## ٣٤ ـ ٤ : اشعاع السنكروترون في الكون

Cosmic synchrotron radiation

كانت الحضارتان الصينية واليابانية في عام ١٠٥٤ من أرقى حضارات العالم . فكان لهما اهتمام بالكون الخارجي وسجلتا في ذلك العـــام ، على نحو رائع ، الظهور المفاجىء لنجم لماع . ( من المدهش أن أحداً من الرهبان الأوروبيين الذين كتبوا كافة كتب العصور الوسطى لم يكلف نفسه عناء الكتابة عن نجم انفجر في السماء ) . ونستطيع اليوم أن نلتقط صورة لذلك النجم وما نراه عندئذ ظاهر على الشكل (٣٤ – ٧) . يظهر من الخارج عدد كبير من الخيوط الحمراء الناجمة عن ذرات الغاز المخلخل التي تشع تواتراتها الخاصة . وتشكل هذه الخيوط طيفاً خطياً لماعاً يحوي مختلف التواترات. وينشأ اللون الأحمر في الحالة الراهنة

عن الآزوت . ومن جهة أخرى نرى في المنطقة المركزية بقعة غريبة غير واضحة الحدود تصدر طيفاً مستمراً ، أي لا توجد تواترات محددة خاصة بذرات معينة . وليست هذه البقعة سحابة من الغبار تنثر الضوء الساقط عليها من النجوم المجاورة



الشكل ( ٣٤-٧ )

الغيمة السديمية الشبيهة بالسرطان كما ترى بكافة ألوانها ( بدون مرشح )

the card nebula as seen in all colors (no filter)

( من الممكن أن يؤدي هذا أيضاً إلى طيف مستمر ) إذ في وسعنا أن نرى النجوم من خلالها فهي شفافة إذن ولكنها تصدر الضوء .

يبين الشكل (٣٤ – ٨) نفس الجسم مصوَّراً بضوء من منطقة الطيف ذات الخطوط غير اللماعة ولهذا فإننا نرى المنطقة المركزية فقط . وفضلاً عن ذلك فقد التقطت الصورتان بمنظار مزود بمقطِّب وهما توافقان اتجاهين للمقطب متعامدين ونرى أن الصورتين مختلفتان وهذا يعني أن الضوء مستقطب . وعلة

ذلك ، كما يفترض ، هي وجود حقل مغناطيسي موضعي ودوران الكثير من الالكترونات ذات الطاقة العالية في هذا الحقل المغناطيسي .

لقد بيّنا قبل قليل كيف تتحرك الالكترونات في الحقل المغناطيسي على دوائر . وفي وسعنا طبعاً أن نضيف إلى هذه الحركة أي حركة منتظمة في منحى الحقل إذ ليس للقوة $q(v \times B$ مركبة وفق هذا المنحى . ومن الجلي أن إشعاع السنكروترون ، كما سبق وأشرنا ، مستقطب في منحى يعامد مرتسم الحقل المغناطيسي على مستوي الرؤية .



( ب )



( أ )

الشكل ( ٣٤ – ٨ )

الغيمة السديمية الشبيهة بالسرطان كما ترى عبر مرشّح ومقطّب .

( أ ) الحقل الكهربائي شاقولي . (ب) الحقل الكهربائي أفقي

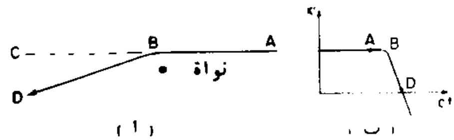
وبمقابلة هاتين الحقيقتين نرى أنـه في المنطقة حيث احدى الصورتين نيّرة والاخرى سوداء يجب ان يكون الحقل الكهربائي للضوء مستقطباً كلياً في منحى واحد. وهذا يعني ان هناك حقلاً مغناطيسياً يعامد ذلك المنحى ، في حين انه في مناطق الاصدار الشديد في الصورة الثانية يجب ان يكون الحقل المغناطيسي مختلفاً . ولو أمعنا النظر في الشكل (٣٤ – ٨) لأمكننا ان نلاحظ انه يوجد ،

على وجه التقريب ، سلسلة من « الخطوط » الذاهبة في اتجاه على احدى الصورتين والذاهبة في اتجاه معامد على الصورة الاخرى . وتظهر الصورتان بنية ليفية الى حد ما . ومن المحتمل ان خطوط الحقل المغناطيسي تمتد الى مسافات كبيرة نسبياً في منحاها الخاص وأنه توجد مناطق ممتدة للحقل المغناطيسي تدور فيها الالكترونات في اتجاه معين، بينما في المناطق الاخرى حيث يكون للحقل منحى آخر تدور الالكترونات ايضاً في اتجاه آخر .

ما الذي يحفظ طاقة الالكترونات عالية الى هـــذا الحد كل هذا الوقت الطويل؟ لقد مضى تسع مائة عام مذ حدث الانفجار فكيف تستطيع الالكترونات الاستمرار في دورانها السريع هذا ؟ ان الكيفية التي تصون بها الالكترونات طاقتها وكذلك استمرار حدوث هذه الظاهرة كلها ما زال يكتنفه الغموض .

## ٣٤ ــ ٥ : اشعاع الانكباح Bremsstrahlung

سنتحدث بايجاز عن أثر طريف آخر وهو اشعاع الجسيمات السريعة جداً للطاقة ، وهذه الظاهرة شبيهة جداً بتلك التي فرغنا من دراستها . لنفترض انه لدينا قطعة مادية حاوية على جسيمات مشحونة يمر بالقرب منها الكترون، مثلا ، سريع جداً، انظر الشكل ( ٣٤ - ٩ ) . فبسبب الحقل الكهربائي حول نواة الذرة ينجذب الالكترون ويتسارع فيظهر على مساره انعطاف خفيف او انثناء . فاذا كانت




الشكل ( ٣٤ - ٩ )

الالكترون السريع المار بجوار النواة يشع طاقة في منحى حركته

سرعة الالكترون مساوية تقريباً لسرعة الضوء فما هو الحقل الكهربائي المتولد في المنحى C ؟ لنتذكر قاعدتنا : نأخذ الحركة الفعلية وننقلها الى الوراء بالسرعة c فيعطينا هذا منحنياً يقيس تقوسه الحقل الكهربائي . لقد كان الالكترون يقترب منا بالسرعة v فنحصل بعد النقل على حركة عكسية وينضغط المسار بكامله ليصغر بقدر ما يكون $c - v$ صغيراً امام c . ولهذا اذا كان $1 - \frac{v}{c} \ll 1$ حدث تقوس حاد وسريع عند $B'$ ونحصل عند حساب المشتق الثاني على حقل شديد في منحى الحركة . وعلى هذا فان الالكترونات ذات الطاقة العالية تشع الى الامام عند اجتيازها للمادة . تسمى هذه الظاهرة اشعاع الانكباح . وفي الحقيقة لا يستعمل السنكروترون عملياً للحصول على الكترونات عالية الطاقة بل لتوليد فوتونات عالية الطاقة أي أشعة غاما . ( في الواقع ما كنا لنقول هذا لو كان في وسعنا اخراج الالكترونات من السنكروترون بشكل أفضل ) ويتم ذلك بامرار الالكترونات السريعة عبر «دريئة» صلبة من التنغستن لتُصدر الفوتونات نتيجة أثر الانكباح المذكور .

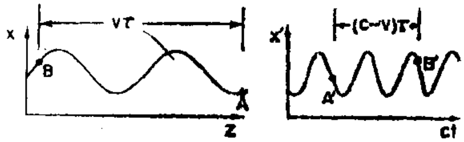
## ٣٤ ــ ٦ : أثر دبلر The Doppler effect

سندرس الآن بعض الامثلة الاخرى على آثار المنابع المتحركة . لنفترض ان المنبع هو ذرة ساكنة تهتز بأحد تواتراتها الخاصة $\omega_0$ فيكون تواتر الضوء المشاهد مساوياً حينئذ $\omega_0$ . لنعتبر الآن مثالاً آخر وليكن لدينا هزاز مماثل يهتز بتواتر $\omega_1$ ويتحرك في الوقت نفسه نحو الراصد بالسرعة v . عندئذ تكون الحركة الفعلية في المكان ، طبعاً ، كما هو مبين على الشكل [ ٣٤ - ١٠ ( أ ) ] وما علينا الآن إلا ان نلعب لعبتنا فنضيف $c\tau$ أي ننقل المنحني بكامله الى الوراء لنجد ان الاهتزاز هو كما في الشكل [ ٣٤ - ١٠ (ب) ] ويقطع الهزاز المسافة $v\tau$ خلال الفترة الزمنية $\tau$ بينما يقطع على المخطط ذي المحورين $x'$ و ct المسافة

$(c-v)\tau$ . ولهذا فان كافة الاهتزازات ، ذات التواتر $\omega_1$ ، التي حدثت خلال الزمن $\Delta\tau$ تحدث الآن خلال الزمن $\Delta\tau\,(1-v/c)$ أي أنها تتراص . وعندما يقترب هذا المنحني منا بالسرعة c فاننا سنرى ضوءاً ذا تواتر أعلى ، ويزداد التواتر بمقدار « عامل الانضغاط » $1-v/c$ بالضبط ولهذا فاننا نشاهد التواتر :

$$\omega = \frac{\omega_1}{1 - v/c} \qquad (34-10)$$

نستطيع ، طبعاً ، تفسير هذه الظاهرة بطرائق اخرى متنوعة . لنفترض ان الذرة كانت تصدر ، عوضاً عن الامواج الجيبية ، سلسلة نبضات « بيب ، بيب ، بيب ، بيب » ، بتواتر معين $\omega_1$ فبأي تواتر تصلنا ؟ تصل الينا النبضة



(أ) (ب)

الشكل (٣٤-١٠)

المنحني x،z والمنحني x′، t′ لهزاز متحرك

الأولى بعد زمن معين بينما تصل الثانية بعد زمن أقصر لأن الذرة اقتربت خلال هذا الزمن من الراصد ؛ وبالتالي فإن الفاصل الزمني بين الإشارات « بيب » قد نقص بسبب الحركة . وإذا حللنا هذه الصورة من وجهة النظر الهندسية وجدنا أن تواتر النبضات يزداد بالعامل $1/(1-v/c)$ .

لو اعتبرنا الآن ذرة عادية تواترها الخاص $\omega_0$ تتحرك نحو الراصد بالسرعة v فهل سيكون $\omega = \omega_0/(1-v/c)$ هو التواتر المشاهد ؟ كلا فنحن نعلم جيداً أن التواتر الخاص $\omega_1$ لذرة متحركة لا يساوي تواترها وهي ساكنة بسبب التباطؤ

النسبوي في انسياب الزمن . فاذا كان $\omega_0$ هو التواتر الخاص الحقيقي فإن التواتر الخاص للذرة المتحركة هو :

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2} \qquad (34 - 11)$$

وبالتالي فإن التواتر المشاهد هو :

$$\omega = \frac{\omega_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}}{1 - v / c} \qquad (34 - 12)$$

يسمى تغير التواتر في هذه الحالة أثر دبلر وخلاصته : اذا تحرك جسم ما نحونا بدا الضوء الذي يصدره أقرب الى البنفسجي . أما اذا ابتعد عنا فان ضوءه يبدو أقرب الى الأحمر .

سنشرح فيما يلي طريقتين اخريين للوصول الى نفس هذه النتيجة الطريفة والمهمة . فلنفترض الآن ان المنبع ساكن ويصدر أمواجاً بتواتر $\omega_0$ بينما يقترب الراصد منه بالسرعة $v$ . ففي خلال الزمن $t$ ينتقل الراصد الى موضع جديد تفصله المسافة $vt$ عن موضعه في اللحظة $t = 0$ . فما عدد راديانات الطور التي مرت أمام الراصد ؟ هناك عدد معين $\omega_0 t$ مرّ أمام أي نقطة ثابتة وبالاضافة الى ذلك خلّف الراصد وراءه عدداً آخر نتيجة حركته وهذا العدد هو بالتحديد $vtk_0$ ( أي المسافة مضروبة في عدد الراديانات في المتر ) . ولهذا فان عدد الراديانات الكلي في وحدة الزمن، أو التواتر المشاهد، سيكون $\omega_1 = \omega_0 + k_0 v$. لقد أجرينا هذا التحليل من وجهة نظر الراصد الساكن ، ونريد الآن معرفة ما يراه الراصد المتحرك . وهنا علينا ، من جديد ، ان ندخل في الاعتبار الفرق بين ساعتي الراصدين وهذا يعني ضرورة قسمة النتيجة على $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . وعلى هذا فانه اذا كان $k_0$ العدد الموجي ، أي عدد الراديانات في المتر في منحى الحركة ، وكان $\omega_0$ التواتر ، فإن التواتر الذي يشاهده الراصد المتحرك هو :

$$\omega = \frac{\omega_0 + k_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (34 - 13)$$

ونحن نعلم انه في حالة الضوء يكون $k_0 = \frac{\omega_0}{c}$ وبالتالي تغدو المعـادلة السابقة في الحالة الخاصة الراهنة :

$$\omega = \frac{\omega_0 (1 + v/c)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (34 - 14)$$

وهي لا تشبه الصيغة (12 - 34) أبداً ! فهل يختلف التواتر الذي نلاحظـه اذا تحركنا نحو المنبع عن التواتر الذي نراه عندمـــا يتحرك المنبع نحونا ؟ كلا بالتأكيد ! تقول نظرية النسبية ان هذين التواترين يجب ان يكونا متساويين بالضبط. ولو كنا مؤهلين رياضيا الى حد كاف لأدركنا على الأغلب أنهما متساويان بالضبط . وبالفعل فإن ضرورة تساوي هاتين العبارتين الرياضيتين هي إحدى الوسائل التي يحلو لبعض الناس ان يبرهنوا بها على ضرورة التباطؤ النسبوي للزمن إذ بدون الجذرين التربيعيين لا تتحقق المساواة أبداً .

وما دمنا نعرف النسبية فلنحلل الظاهرة بطريقة ثالثة قد تبدو اكثر شمولا بقليل من الطريقتين الأخريين ( في الحقيقة يبقى جوهر الأمر على حـاله إذ لا أهمية للكيفية التي نحصل بها على النتيجة ). هناك علاقة ، في نظرية النسبية ، بين المكان والزمان كما يلاحظها راصد أول ، والمكان والزمان كما يراهما راصد ثان متحرك بالنسبة للأول . ولقد سبق ان كتبنا هذه العلاقات في الفصل السادس عشر وهي عبارة عن تحويلات لورنتس المباشرة والعكسية :

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{x + vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} , & x &= \frac{x' - vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ t' &= \frac{t + vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} , & t &= \frac{t' - vx'^2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned}\right\} \qquad (34 - 15)$$

لو كنا واقفين دون حركة على الأرض لكانت الموجة من الشكل $\cos(\omega t - kx)$ ولتبعت كافة العقد والنهايات العظمى والصغرى هذا الشكل . ولكن ما عسى الراصد المتحرك يرى عندما يراقب نفس الموجة الفيزيائية ؟ عندما يكون الحقل معدوماً فإن مواضع كافة العقد تبقى نفسها ( عندما يكون الحقل معدوماً فإن أي راصد يقيس الحقل يجده معدوماً ) فهذا لا متغير نسبوي . وعلى هذا فإن الشكل هو نفسه بالنسبة إلى الراصد الآخر أيضاً وما علينا سوى كتابته في جملة إحداثيات الراصد المتحرك فنجد :

$$\cos(\omega t - kx) = \cos\left[\omega \frac{t' - vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - k\frac{x' - vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right]$$

وباعادة ترتيب الحدود بين القوسين نجد :

$$\cos(\omega t - kx) = \cos\left[\underbrace{\frac{\omega + kv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}\, t' - \underbrace{\frac{k + v\omega/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}}\, x'\right]$$

$$\cos(\omega t - kx) = \cos[\omega' t' - k' x'] \qquad (34-16)$$

وهذه أيضاً موجة ، وهي موجة جيبية فيها التواتر $\omega'$ هو المثل الثابت المضروب بـ $t'$ وفيها ثابت آخر $k'$ مضروب بـ $x'$ . نسمي $k'$ العدد الموجي ، أو عدد الأمواج في المتر ، بالنسبة إلى الراصد المتحرك . وبالتالي فإن هذا الراصد سوف يلاحظ تواتراً جديداً وعدداً موجياً جديداً يعطيان بالعلاقتين :

$$\omega' = \frac{\omega + kv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (34-17)$$

$$k' = \frac{k + \omega v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (34-18)$$

ولو نظرنا إلى المعادلة (34—17) لرأينا أنها نفس العلاقة (34—13) التي حصلنا عليها بمحاكمات فيزيائية أقرب تناولا .

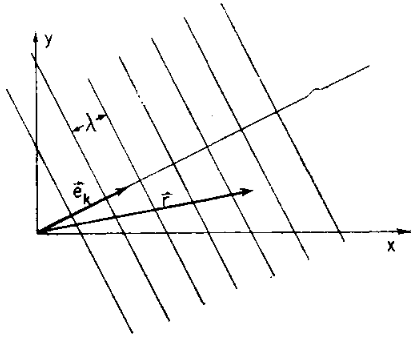
## ٣٤ ــ ٧ : المتجهة الرباعية (ω ، k)

The ω, k four-vector

إن العلاقات المبينة في المعادلتين (17 – 34) و (18 – 34) مشوقة جداً لأنها تبين أن التواتر الجديد $\omega'$ هو اتحـاد بين التواتر القديم $\omega$ والعدد الموجي القديم ، وأن العدد الموجي الجديد هو اتحاد بين العدد الموجي والتواتر القديمين. ثم إن العدد الموجي هو معدل تغير الطور مع المسافة ، والتواتر هو معدل تغير الطور مع الزمن . ونرى في هاتين المعادلتين تماثلاً عميقـاً مع تحويلات لورنتس للمكان والزمان : فلو قابلنا بين $\omega$ و $t$ ثم بين $k$ و $x/c^2$ لكانت $\omega'$ مقابلة لـ $t'$ و $k'$ لـ $x'/c^2$ . وبعبارة أخرى ، عند إجراء تحويلات لورنتس فإن $\omega$ و $k$ تتحول مثل $t$ و $x$ . يؤلف المقداران $\omega$ و $k$ مانسميه المتجهة الرباعية . وعندما يكون المقدار أربعة مركبات تتحول كالزمان والمكان فانه يكون متجهة رباعية . يبدو إذن أن الامور على ما يرام باستثناء شيء صغير : فقد قلنا إن للمتجهة الرباعية أربعة مركبات فأين المركبتان الاخريان ؟ لقد رأينا أن $\omega$ و $k$ تشبهان الزمان والمكان في منحى واحد من مناحي المكان وليس فيهـا جميعاً ولهذا علينا أن ندرس فيما يلي مسألة انتشار الضوء في مكان ذي أبعاد ثلاثة .

لتكن لدينا جملة الاحداثيات ( $x, y, z$ ) وموجة تنتشر بحيث يمثل الشكل (٣٤ ــ ١١) صدورها . إن طول الموجة هو $\lambda$ ولكن منحى حركة الموجة لا ينطبق على أي من المحاور فما هي صيغة الحركة لموجة كهذه ؟ الجواب ، وضوحاً ، هو $\cos(\omega t - ks)$ حيث $k = 2\pi/\lambda$ و $s$ هي المسافة مأخوذة وفق منحى حركة الموجة أي مرتسم متجهة الموضع وفق منحى الحركة . لنعبِّر عن هذه النقطة بالشكل التالي : إذا كان $\mathbf{r}$ متجهة الموضع لنقطة في الفضاء فان $s$ هي $\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_k$ حيث $\mathbf{e}_k$ متجهـة الوحـــدة وفق منحى الحركة . أي أن $s$ هي

فهي مركبة المسافة على منحى الحركة . وبالتالي فاننا نعبر عن $r \cos(\mathbf{r}, \mathbf{e}_k)$ موجتنا بالصيغة $\cos(\omega t - k\mathbf{e}_k . \mathbf{r})$ .




الشكل ( ٣٤ - ١١ )

موجة مستوية تنتشر في منحى مائل
oblique direction

ومن المناسب جداً الآن أن نعرّف متجهة $\mathbf{k}$ تسمى متجهة الموجة طولها يساوي العدد الموجي $2\pi / \lambda$ وموجهة في منحى انتشار الموجة أي :

$$\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{e}_k = k\mathbf{e}_k \qquad (34-19)$$

يمكننا باستخدام هذه المتجهة ان نكتب موجتنا بالشكل $\cos(\omega t - \mathbf{k.r})$ او $\cos(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)$ . والآن ما معنى احدى مركبات $k$ ، $k_x$ مثلاً ؟ من الواضح أن $k_x$ هو معدل تغير الطور بتابعية $x$ . فاذا فحصنا الشكل ( ٣٤ - ١١ ) رأينا ان الطور يتغير بتغير $x$ تماماً كما لو كانت هناك موجة تنتشر وفق $x$ إنما ذات طول موجي أكبر . « فالطول الموجي في المنحى $x$ » أطول من الطول الحقيقي بقاطع الزاوية $\alpha$ بين منحى الانتشار الفعلي والمحور $x$ أي أن :

$$\lambda_x = \lambda / \cos \alpha \qquad (34-20)$$

وبالتالي فإن معدل تغير الطور ، المتناسب عكساً مع $\lambda_x$ ، أصغر بالعامل $\cos \alpha$ . تلك هي الكيفية التي يتغير بها $k_x$ فهو جداء طول $\mathbf{k}$ في جيب تمام الزاوية بين $\mathbf{k}$ والمحور $x$ !

هذا اذن هو معنى متجهة الموجة التي نستخدمها لتمثيل الموجة المنتشرة في الأبعاد الثلاثة . وتتحول الكميات الأربع $\omega$ و $k_x$ و $k_y$ و $k_z$ في النسبية كمتجهة رباعية ، حيث تقابل $\omega$ الزمن و $k_x$ و $k_y$ و $k_z$ تقابل المركبات $x, y, z$ للمتجهة الرباعية .

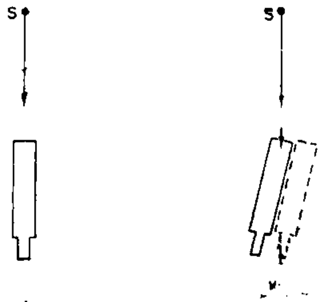
تعلمنا عندما بحثنا النسبية الخاصة في الفصل السابع عشر طرائق ايجاد الجداءات السلمية النسبوية للمتجهات الرباعية . فإذا أخذنا متجهة الموضع $x_\mu$ حيث تشير $\mu$ الى أربع مركبات ( الزمن وثلاث مركبات مكانية ) وسمينا متجهة الموجة $k_\mu$ حيث تشير $\mu$ هنا أيضاً الى أربع مركبات ( الزمن وثلاث مكانية ) كتبنا الجداء السلمي لـ $x_\mu$ و $k_\mu$ بالشكل $\Sigma' k_\mu x_\mu$ ( راجع الفصل ١٧ ) فان هذا الجداء السلمي هو مقدار لا متغير مستقل عن جملة الاحداثيات ماقيمته ؟ إننا نجد من تعريف الجداء السلمي في الأبعاد الأربعة أن :

$$\Sigma' k_\mu x_\mu = \omega t - k_x x - k_y y - k_z z \qquad (34-21)$$

ونحن نعلم من دراستنا للمتجهات ان $\Sigma' k_\mu x_\mu$ لا متغير فيما يخص تحويلات لورنتس ما دام $k_\mu$ متجهة رباعية . وهذا الجداء بالذات هو الذي يدخل تحت رمز جيب التمام في صيغة الموجة المستوية . ويتحتم عليه ان يكون مقدارا لا متغيراً فيما يخص تحويلات لورنتس . ولا يمكن ان نحصل على صيغة يدخل فيها تحت رمز جيب التمام مقدار متغير لأننا نعلم ان طور الموجة لا يمكن ان يتغير بتغير جملة الاحداثيات .

## ٣٤ ـ ٨ : الزيغ *Aberration*

عالجنا عند اشتقاق الصيغتين ( 17 – 34 ) و ( 18 – 34 ) مثالاً بسيطاً كان فيه **k** في منحى الحركة. إلا اننا نستطيع طبعاً تعميم ذلك ليشمل حالات اخرى أيضاً . لنفترض مثلا ان هناك منبعاً يرسل الضوء في منحى معين بالنسبة الى راصد ساكن وأننا نتحرك على سطح الارض كما في الشكل ( ٣٤ - ١٢ ) . فمن




( أ )　　　( ب )

الشكل ( ٣٤ - ١٢ )

ينظر الى المنبع الضوئي البعيد S :

(أ) بمنظار ساكن و (ب) بمنظار يتحرك جانبيا

أي منحى يبدو لنا الضوء آتياً ؟ لإيجاد الجواب علينا أن نكتب مركبات $k_\mu$ الأربع وأن نجري تحويلات لورنتس . ويمكن مع ذلك الوصول إلى الجواب بالمحاكمة التالية : لكي نرى الضوء يجب تدوير المنظار زاوية معينة . لماذا ؟ لأن الضوء ينتشر نحو الأسفل بالسرعة c ونحن نتحرك جانبياً بالسرعة v ولهذا يجب إمالة المنظار إلى الأمام بحيث أن الضوء الذي يدخل فيه يمر « رأساً » إلى أسفله . ومن السهل أن نرى أن المسافة الأفقية هي vt في حين أن المسافة الشاقولية هي ct وبالتالي إذا كانت $\theta'$ هي زاوية الميل كان $\tan\theta' = v/c$ .

ما أجمل هذا ! ما أجملة بالفعل لولا شيءٌ صغير : ليست $\theta'$ الزاوية التي يجب إمالة المنظـار بها بالنسبة إلى الأرض لأننا أجرينا محاكاتنا من وجهـة نظر راصد « ثابت » . وعندما نقول إن المسافة الأفقية هي vt فإن الراصد على الأرض يجد هذه المسافة مختلفة لأنه يقيسها بسطرته « المتقلصة » . وبسبب فعل التقلص هذا يكون :

$$\tan\theta = \frac{v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (34-22)$$

وهذه الصيغة مكافئة لـ :

$$\sin\theta = v/c \qquad (34-23)$$

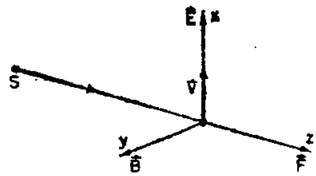
ومن المفيد للطالب أن يصل بنفسه إلى هذه النتيجة باستخدام تحويلات لورنتس .

تسمى هذه الظاهرة ، أي ضرورة إمالة المنظـــار زيغـــاً وقد شوهد تجريبياً . ولكن كيف نستطيع مشاهدته ؟ من ذا الذي يعرف المكان الفعلي لنجم معين ؟ لنفترض أنه يجب علينا فعلاً أن ننظر باتجاه خاطىء لنرى نجماً ما فكيف نعلم أنه خاطىء ؟ تدور الأرض حول الشمس ولهذا فإننا إذا أملنا اليوم المنظـــار إلى جهة معينة وجب علينا بعد ستة شهور إمالة المنظـــار إلى الجهة المعاكسة . هذه هي الكيفية التي نتبين بها وجود هذه الظاهرة .

## ٣٤ — ٩ : اندفاع الضوء *The momentum of light*

سننتقل الآن إلى موضوع آخر . في الفصول القليلة الماضيـة لم نتحدث على الاطلاق عن تأثير الحقل المغناطيسي للضوء . إن تأثير الحقل المغناطيسي ضعيف جداً عادة ولكنْ هناك ظاهرة طريفة ومهمة يسببها الحقل المغناطيسي . لنتصور

ضوءاً آتياً من منبع ما وانه يفعل في شحنة فيجعلها تهتز صعوداً وهبوطاً . سنفترض أن الحقل الكهربائي هو في المنحى x وبالتالي فإن حركة الشحنة هي أيضاً في هذا المنحى وتكون فاصلة الشحنة x وسرعتها v كما هو ظاهر على الشكل ( ٣٤ — ١٣ ) . إن الحقل المغناطيسي يعامد الحقل الكهربائي . وعندما




الشكل ( ٣٤ — ١٣ )
القوة المغناطيسية المؤثرة في شحنة خاضعة
لفعل حقل كهربائي هي في منحى الحزمة الضوئية

يؤثر الحقل الكهربائي على الشحنة فيحركها إلى الأعلى والأسفل، ماذا يفعل الحقل المغناطيسي ؟ إن الحقل المغناطيسي يؤثر في الشحنة ( الكترون مثلاً ) عندما تكون متحركة فقط . بيد أن الالكترون يتحرك بتأثير الحقل الكهربائي ولهذا فإن الحقلين يعملان معاً . ويخضع الالكترون أثناء حركته إلى الأعلى والأسفل إلى قوة مساوية Bvq . ولكن ما منحى هذه القوة ؟ إنه منحى انتشار الضوء . ولهذا عندما يسقط الضوء على شحنة فيهزها تنشأ قوة تجر الشحنة باتجاه الحزمة الضوئية . تسمى هذه الظاهرة ضغط الإشعاع أو ضغط الضوء .

لنعين قيمة ضغط الاشعاع هذا . من الواضح أنها تساوي $F = qvB$ أو انها تساوي المتوسط الزمني لـ F أي $< F >$ ، وذلك لاهتزاز الحقل والشحنة . ونرى من العلاقة (34— 2) أن شدة الحقل المغناطيسي تساوي شدة الحقل الكهربائي مقسومة على c . ولهذا علينا إيجاد متوسط جداء الحقل الكهربائي في السرعة في الشحنة مقسوماً على c أي : $< F > = q < vE >/c$ . ولكن جداء الحقل

الكهربائي في الشحنة هو القوة الكهربائية الفاعلة في الشحنة ، وجداء القوة في السرعة هو العمل المنجز في وحدة الزمن dW/dt . ولهذا فإن القوة التي يقدمها الضوء في وحدة الزمن تساوي الطاقة الضوئية الممتصة في الثانية مقسومة على c . إن هذه القاعدة عامة إذ لم نذكر شيئاً عن قوة الهزار أو عن التفاني المتبادل بين الشحنات . فحينما يُمتص الضوء ينشأ ضغط . والاندفاع الذي يقدمه الضوء يساوي دائماً الطاقة الممتصة مقسومة على c أي أن :

$$< F > = \frac{dW/dt}{c} \qquad (34-24)$$

نحن نعلم ان الضوء يحمل معه طـــاقة . وأصبحنا نعرف الآن انه يحمل معه اندفاعاً أيضا وفضلا عن ذلك فإن الاندفاع المحمول يساوي الطاقة مقسومة على c.

عندما ينبعث الضوء من المنبع تحدث ظـاهرة الارتداد : أي الشيء نفسه ولكن معكوساً . وعندما تشع الذرة الطاقة W في منحى ما ينشأ اندفاع ارتدادي قدره $p = \frac{W}{c}$ . فاذا انعكس الضوء ناظميا على مرآة حصلنـــا على ضعف القوة .

يقع ما قيل في إطار النظرية الكلاسيكية للضوء . ولكننا نعلم طبعا ان هناك نظرية كوانتية، وأن سلوك الضوء يشبه في كثير من الوجوه سلوك الجسيم . وتساوي طاقة الجسيم الضوئي التواتر مضروبا بثابت :

$$W = h\nu = \hbar\omega \qquad (34-25)$$

اننا ندرك الآن ان الضوء أيضاً يحمل اندفاعا مساويا الطاقة مقسومة على c، ولهذا يصح القول أيضاً ان هذه الجسيمات الفعالة ، أي هذه الفوتونات ، تحمل اندفاعاً ويكون :

$$p = W/c = \hbar\omega/c = \hbar k \qquad (34-26)$$

ومنحى الاندفاع هو ، بطبيعة الحال ، منحى انتشار الضوء . ونكتب هذا بالشكل المتجه كما يلي :

$$W = \hbar\omega, \qquad \mathbf{p} = \hbar\mathbf{k} \qquad (34-27)$$

ونعلم أيضاً ، طبعاً ، ان طاقة الجسم واندفاعه يجب ان تؤلف متجهة رباعية . ولقد اكتشفنا للتوان $\omega$ و $\mathbf{k}$ تؤلف متجهة رباعية . ولهذا فإن دخول ثابت واحد في المعادلتين ( 27 — 34 ) هو شيء بديع . وهو يعني ان هناك انسجاماً متبادلاً بين النظرية الكوانتية والنظرية النسبية .

يمكن كتابة المعادلة (27 — 34) كتابة اكثر أناقة بالشكل $p_\mu = \hbar k_\mu$ وهذه معادلة نسبوية لجسم مواكب لموجة . وعلى الرغم من أننا ناقشنا هذه المعادلة في حالة الفوتونات التي من أجلها $k$ ( اي طول $\mathbf{k}$ ) يساوي $\omega/c$ و $p = W/c$ فإن المعادلة المذكورة اكثر شمولا بكثير . ففي الميكانيك الكوانتي تبدي كافة الجسيمات ، وليس الفوتونات فقط ، خصائص موجية ويرتبط التواتر والعدد الموجي للأمواج بطاقة واندفاع الجسيمات بالعلاقتين ( 27 — 34 ) ( وهما تسميان علاقتي دوبروي ) حتى ولو لم يكن $p$ مساوياً $W/c$ .

رأينا في الفصل السابق أن حزمة ضوئية مستقطبة استقطاباً دائرياً يمينياً أو يسارياً تحمل أيضاً اندفاعاً زاوياً تتناسب قيمته مع طاقة الموجة $\mathcal{E}$ . وتعتبر الحزمة الضوئية المستقطبة دائرياً ، من وجهة النظر الكوانتية، سيلا من الفوتونات يحمل كل منها اندفاعاً زاوياً $\pm \hbar$ وفق منحى الانتشار. هذا هو مآل الاستقطاب من وجهة النظر الجسيمية : تحمل الفوتونات اندفاعاً زاوياً مثل الرصاصة الدوارة الخارجة من بندقية . ولكن هذه الصورة « ذات الرصاصة » هي ، في الواقع ، غير كاملة بنفس الدرجة مثل الصورة « ذات الموجة » وسيكون علينا ان نناقش هذه الافكار مناقشة اكثر كمالا في فصل لاحق عن السلوك الكوانتي .

## مسائل وتمارين

٣٤ - ١ : يتدحرج قرص نصف قطره A ، بدون انزلاق على مستو أفقي . اكتب معادلة المسار الذي ترسمه نقطة على بعد $R \leqslant A$ من مركز القرص ، بدلالة كل من A و R ، والزاوية θ التي دارها القرص . قس x شاقولياً ، و z أفقياً ، بدءاً من مركز القرص .

٣٤ - ٢ : إذا كانت $z = ct$ ، فأوجد التسارع العرضي $d^2x/dt^2$ للنقطة . وهذا هو التسارع المؤخر اللازم لحساب الإشعاع الصادر عن جسيم متحرك في مسار دائري نصف قطره R . عبّر عن النتيجة بدلالة المقادير التالية القابلة للمشاهدة : R و v ( سرعة الجسيم على مساره ) ، و x ( الموضع العرضي الظاهري للجسيم لحظة المشاهدة ) .

٣٤ - ٣ : أوجد نسبة شدتي الإشعاع اللذين يشاهدان عندما يتحرك الجسيم ، في مساره الدائري ، مقترباً من الراصد ومبتعداً عنه .

٣٤ - ٤ : برهن على صحة العلاقة $\sin\theta = v/c$ مستخدماً تحويل لورنتس ، فتكون بذلك قد فعلت ما اقترحناه في الفقرة ( ٣٤ - ٨ ) .

٣٤ - ٥ : بيّن أن سرعة الكترون ، طاقته 1 Gev ، تختلف عن c بجزء واحد من $8 \times 10^6$ جزء .

٣٤ - ٦ : يلاحظ أن الخطين D للصوديوم ( الطول الموجي المخبري 589.0 mμ ) منزاحان إلى 588.0 mμ في الطيف الصادر عن نجم معين . فما هي

سرعة النجم بالنسبة للراصد ؟ وهل نحتاج إلى التصحيح الذي تفرضه النسبية ؟

٣٤ – ٧ : استنتج الفلكي ر . منكوفسكي ، الذي يعمل في معهد ( كالتك ) ، ان أبعد سديم ، أجرى عليه مشاهداته ، كان يبتعد بسرعة تساوي $0.6\ c$ . فما هو انزياح دوبلر الذي سيشاهد في الضوء الصادر من هذا السديم ؟ أوجد الطول الموجي المشاهد للخط الطيفي الذي طوله الموجي المخبري $300\ m\mu$ .

٣٤ – ٨ : اكتشف برادلي ( في عام ١٧٢٨ ) زيغ الضوء الذي يجعل النجوم تبدو منزاحة في السماء بسبب حركة الأرض في مدارها . وينبغي ، بسبب ذلك ، أن تدار النظارة الفلكية إلى الأمام بقوس قيمته العظمى $20.5''$ ، وذلك من أجل نجوم قريبة من قطب دائرة البروج .

فاذا تذكرنا أن سرعة الضوء هي ، كما هو معلوم ، $3.00 \times 10^{8}\ m/sec$ ، فالى أية قيمة ، لنصف قطر مدار الأرض ، توصلنا هذه المشاهدة ؟

٣٤ – ٩ : افرض أن المكان ، الكائن بين الكواكب السيارة ، تشغله ذرات صغيرة من «الغبار» ، وزنها النوعي الوسطي $\rho$ ، وشكلها شكل كرة تقريباً نصف قطرها $R$ والمطلوب :

( أ ) بيّن أن نسبة الجذب الثقالي باتجاه الشمس إلى ضغط الإشعاع بعيداً عن الشمس ، من أجل أي حجم من ذرة الغبار ، لا تتعلق بالبعد عن الشمس .

( ب ) باستخدام الحقيقة القائلة ان شدة الإشعاع الشمسي ، عند مدار الأرض ، تساوي $1374\ W.m^{-2}$ ، وبفرض أن المقطع العرضي للامتصاص هو $\pi R^{2}$ ، أوجد نصف القطر $R$ الذي يتساوى عنده ضغط الإشعاع والجذب الثقالي .

( هـ ) إذا أخذنا نتائج الفصل الثاني والثلاثين بعين الاعتبار، فهل يمكن للمقطع العرضي الفعـال لذرة الغبار أن يكون أكبر من $\pi R^2$ بمقدار محسوس .

١٠–٣٤ : إن أحد الوسائل المقترحـة للسير في الفضاء ، هو استعمال صفيحة رقيقة من غشاء بلاستيكي شديد العكس « كشراع » يدفعه ضغط الاشعاع . لنفرض أن لدينا صفيحة مستوية مساحتها 100 متر مربع، وان كتلة سفينة الفضاء تساوي $10^3$ kg . فاذا كانت سفينة الفضاء تسير في الأصل في مدار دائري نصف قطره 1 A.U. حول الشمس، فصف كيف يمكن استعمال « الشراع » لزيادة نصف القطر الوسطي المدار ، ثم أوجد بأي معدل سينمو نصف قطر المدار هذا .

★ ★ ★

# الفصل الخامس والثلاثون

Color Vision

# رؤية الألوان

## ٣٥ ـ ١ : عين الانسان *The human eye*

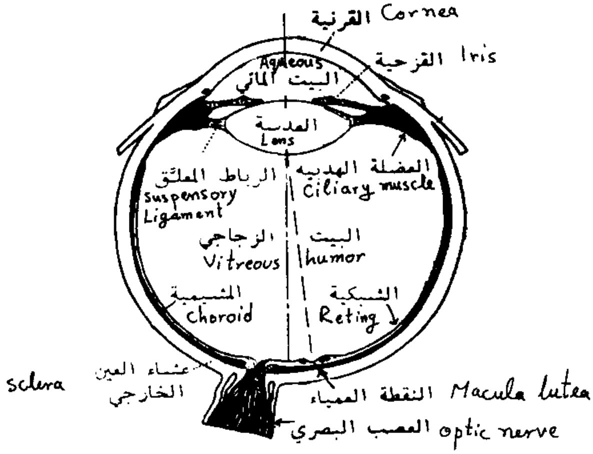
تتوقف ظاهرة الألوان جزئياً على العالم الفيزيائي . وقد بينا أن ألوان أغشية الصابون وغيرها تنشأ عن التداخل . ولا شك في أنها تتوقف أيضاً على العين أو على ما يحدث وراءها في الدماغ . وتدرس الفيزياء سلوك الضوء حتى دخوله الى العين ، أما بعد ذلك فإن إحساساتنا هي نتيجة عمليات ضوئية ـ كيميائية ـ عصبية واستجابات نفسية .

تتصل بالرؤية ظواهر مثيرة عديدة هي مزيج من ظواهر فيزيائية وعمليات فيزيولوجية ، ولهذا فإن الإدراك الكامل للظواهر الطبيعية كما نراها يجب أن نخرج عن نطاق الفيزياء بمعناها المألوف . ولن نقدم اعتذارا على قيامنا بجولات في حقول العلم الأخرى لأن تقسيم هذه الحقول ، كما سبق وأكدنا ، ليس من صنع الطبيعة بل صنعه الانسان لراحته . ولا تهتم الطبيعة بتقسيماتنا هذه، بل إن عدداً كبيراً من الظواهر المهمة يشكل صلة وصل بين فروع العلم المختلفة .

تحدثنا في الفصل الثالث عن علاقة الفيزياء بالعلوم الأخرى بوجه عام ، ونود الآن أن ندرس بشيء من التفصيل حقلا معيناً تتشابك فيه الفيزياء والعلوم الاخرى إلى حد بعيد ألا وهو الرؤية . وسوف نبحث رؤية الألوان بصفة

خاصة . وسنتعرض في هذا الفصل للظواهر المتصلة بالرؤية عند الانسان بالدرجة الاولى ، اما في الفصل التالي فسوف ننظر في المظاهر الفيزيولوجية للرؤية عند الانسان والحيوان .

تبدأ الرؤية في العين ، ولهذا لا بد لنا من بعض المعلومات عن العين لفهم الظواهر التي نراها . سنبحث في الفصل التالي بشيء من التفصيل وظائف مختلف أجزاء العين وعلاقتها بالجملة العصبية . أما الآن فسوف نصف بإيجاز عمل العين انظر الشكل ( ٣٥ – ١ ) .

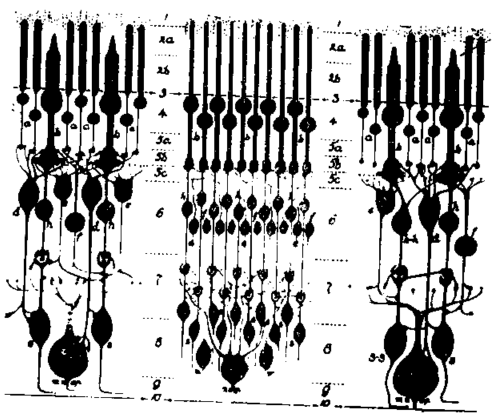



الشكل ( ٣٥ – ١ )
**العين**

يدخل الضوء العين عبر القرنية ؛ وقد سبق أن بحثنا في انكساره وتشكل الخيال على الطبقة المسماة الشبكية في الجزء الخلفي من العين . وتتلقى أجزاء الشبكية المختلفة الضوء من أجزاء مختلفة من حقل الرؤية الخارجي . وليست الشبكية متجانسة تماماً : فهناك موضع ( بقعة ) في مركز حقل الرؤية نستخدمه عندما نحاول رؤية الاشياء بأكبر وضوح وتكون حدة الرؤية فيه عظمى ، ويسمى هـذا الموضع النُقَيْرة المركزية أو البقعة الصفراء . ونحن ندرك من

خبرتنا في النظر إلى الأشياء أن الأجزاء الجانبية في العين ليست فعالة في تمييز تفاصيل الأشياء مثل المنطقة المركزية . وتوجد في الشبكية بقعة أخرى ، وهي الموضع الذي تغادر فيه الأعصاب العين حاملة المعلومات ، وتسمى البقعة أو النقطة العمياء . وتكون الشبكية فيها عديمة الحساسية ، ونستطيع أن نتبين ذلك إذا أغلقنا العين اليسرى مثلاً ونظرنا أمامنا إلى شيء ما ثم أخرجنا ببطء أصبعنا ( أو شيئاً صغيراً آخر ) من حقل الرؤية فنلاحظ أنه يختفي فجأة في مكان ما . ولا نعلم سوى فائدة عملية وحيدة لهذا الشيء وهي أن أحد الفيزيولوجيين بيّن هذه الحقيقة لأحد ملوك فرنسا فأصبح من المقربين لدى البلاط وصار الملك يتلهى في الجلسات المتعبة مع رجال البلاط « بقطع رؤوسهم » وذلك بالنظر إلى أحدهم ومراقبة اختفاء رأس الآخر .

يبين الشكل (٣٥ — ٢) بنية الشبكية بصورة مكبرة وتخطيطية نوعاً ما . وتختلف البنية من جزء لآخر في الشبكية . وتسمى الأجسام التي تصادف أكثر من غيرها قرب المنتهى العصبي للشبكية العصيات . ونجـــد عند الاقتراب من



الشكل (٣٥ - ٢)
بنية الشبكية . (يدخل الضوء من الاسفل)

النقيرة المركزية بالإضافة إلى هذه الخلايا العصوية خلايا مخروطية . وسنصف فيما بعد بنية هذه الخلايا . وكلما اقتربنا من النقيرة ازداد عدد المخاريط ، ولا يوجد في النقيرة نفسها سوى مخاريط متراصة إلى درجة تجعلها أرفع أو أضيق منها في أي مكان آخر . علينا أن ندرك إذن أننا نرى بواسطة الخلايا المخروطية في وسط حقل الرؤية تماماً أما عند الانتقال نحو المنتهى العصبي فلدينا الخلايا الأخرى، العُصيات. والأمر المثير هو أن أي خلية حساسة للضوء ليست متصلة بالعصب البصري مباشرة بل تتصل بخلايا أخرى عديدة متصلة فيما بينها . وهناك عدة أنواع من الخلايا : فمنها ما ينقل المعلومات نحو العصب البصري ، ومنها خلايا تتصل فيما بينها « أفقياً » بصورة رئيسية . وهناك أربعة أنواع أساسية من الخلايا إلا أننا لن ندخل الآن في هذه التفاصيل . والفكرة الرئيسية التي نؤكد عليها هي أن الإشارة الضوئية تجد هنا في الشبكية ما « يفكر فيها » . أي أن المعلومات لا تذهب من مختلف الخلايا إلى الدماغ مباشرة ، بل يتم استيعاب كمية معينة منها في الشبكية نفسها عن طريق تجميع المعلومات الواردة من عدة مستقبلات بصرية. ومن المهم أن نفهم أن بعض الوظائف الخاصة بالدماغ تحدث في العين نفسها .

## ٣٥ — ٢ : توقف اللون على الشدة Color depends on intensity

من أكثر ظواهر الرؤية إثارة للدهشة تكيف العين مع الظلام . فإذا انتقلنا من غرفة شديدة الضياء إلى أخرى مظلمة ، لا نرى ، لبعض الوقت ، أي شيء بوضوح. وبالتدريج تبدأ الأشياء تظهر بوضوح متزايد ونستطيع في النهاية أن نرى شيئاً حيث كنا لا نرى قبلاً أي شيء . وتبدو الاشياء عديمة اللون إذا كانت شدة الضوء ضعيفة جداً . ومن المعروف أن الرؤية المتكيفة مع الظلام تحدث بالتمام تقريباً بفضل العصيات ، في حين أن الرؤية في الضوء الساطع تحدث بفضل المخاريط .

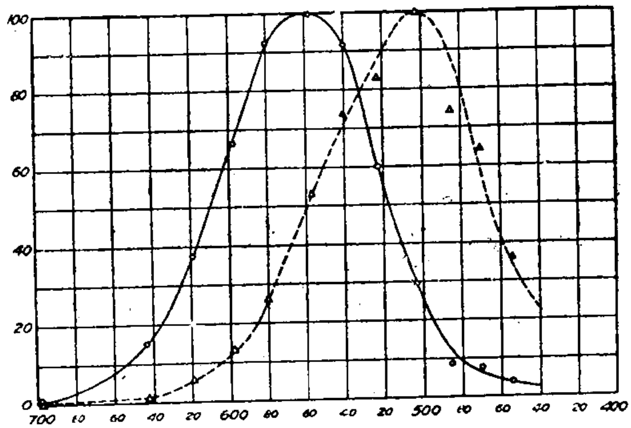
ونتيجة لهذا فإننا ندرك بسهولة عدداً من الظواهر بسبب انتقال وظيفة الرؤية من المخاريط والعصيات معاً إلى العصيات وحدها .

هناك حالات كثيرة لو ازدادت فيها شدة الضوء لرأينا الالوان ووجدنا الاشياء جميلة حقاً . فعندما ننظر مثلاً بالنظارة الفلكية إلى الغيوم السديمية الضعيفة نرى دائماً تقريباً أخيلة « سوداء وبيضاء » . إلا أن الفلكي ميلر ( من مرصدي جبل ويلسون وبالومار ) كان لديه الصبر اللازم للحصول على صور ملونة لبعض هذه الاجسام . ولم ير أحد قط هذه الالوان بعينيه ولا يعني هذا أنها ألوان اصطناعية ، كل ما في الامر هو أن شدة الضوء ليست كافية كي تستطيع مخاريط عيننا أن تراها . ومن أكثر هذه الأجسام إثارة للعجب نذكر الغيمة السديمية الحلقية والغيمة السديمية الشبيهة بالسرطان . فالقسم الداخلي في الأولى أزرق جميل تحيط به هالة حمراء ساطعة . أما الثانية فهي عبارة عن ضباب رقيق مزرق تتخلله خيوط حمراء برتقالية ساطعة .

إن حساسية العصيات في الضوء الساطع صغيرة جداً حسب الظاهر ، إلا أنها في الظلام تستعيد بمرور الوقت قدرتها على رؤية الضوء . هذا وإن تغيرات شدة الضوء التي تستطيع العين التكيف معها تفوق نسبة المليون إلى الواحد . ولا تقوم الطبيعة بكل هذا بنوع واحد فقط من الخلايا بل تنقل العمل من خلايا رؤية الضوء الساطع ، وهي خلايا الرؤية الملونة ، أي المخاريط ، إلى خلايا رؤية الضوء الضعيف ، وهي خلايا التكيف مع الظلام ، أي العصيات . وينشأ عن هذا نتائج مهمة منها ، أولاً ، انعدام الألوان ( في الظلام ) ثم ، ثانياً ، وجود فرق في السطوع النسبي للأجسام المختلفة الألوان . وقد تبين ان العصيات ترى نهاية الطيف الزرقاء أفضل من المخاريط ، وان المخاريط ترى مثلاً الضوء الأحمر الغامق بينما تعجز العصيات عن رؤيته تماماً . ولهذا فإن اللون الأحمر هو أسود بالنسبة إلى العصيات . وهكذا فإن قطعتين من الورق الملون ، بالازرق والاحمر

مثلا ، حيث الاحمر أسطع من الازرق عندما تكون الاضاءة جيدة ، تبدوان في الظلمة بشكل معكوس تماماً . وهذه ظاهرة مدهشة كثيراً . فإذا كنا في الظلام ووجدنا مجلة أو شيئاً آخر ملوناً ، ولم يكن لنا علم بهذه الالوان ، وحددنا المناطق الساطعة والمظلمة في الصورة ثم انتقلنا إلى النور ، فمن الجائز أن نرى تغيراً كبيراً في سطوع الالوان . تعرف هذه الظاهرة باسم أثر بوركينيه Purkinje .

يمثل المنحني المنقط على الشكل (٣٥-٣) حساسية العين في الظلام أي عند




الشكل ( ٣٥ - ٣ )

حساسية العين الطيفية . المنحني المنقط للعصبات والمستمر للمخاريط
The spectral sensitivity of the eye. Dashed curve, rods, solid curve cones.

استخدام العصيات ، بينما يمثل المنحني المستمر الحساسية في النور . ونرى أن ذروة حساسية العصيات تقع في المنطقة الخضراء وأن ذروة حساسية المخاريط في المنطقة الصفراء . فنستطيع أن نرى ورقة حمراء إذا كانت مضاءة اضاءة ساطعة ( طول موجة اللون الاحمر هو حوالي 650 ميلي ميكرون ) ، أما في الظلام فإنها تصبح غير مرئية تقريباً .

هناك أثر آخر ناجم عن كون العصيات تعمل في الظلام وعن انعدام وجودها

في النقيرة المركزية ، وهو أنه عندما ننظر في الظلام إلى شيء أمامنا فإن الرؤية لا تكون حادة مثلما تكون عندما ننظر جانبياً . فيمكن أحياناً أن نرى نجماً ضعيفاً أو غيمة سديمية بشكل أفضل إذا نظرنا إلى الجانب قليلاً عوضاً عن النظر المباشر بسبب انعدام وجود العصيات الحساسة في النقيرة .

هناك أثر طريف آخر ناجم عن تناقص عدد المخاريط عند الانتقال إلى حافة حقل الرؤية وهو أنه عندما يبتعد الجسم جانبياً يختفي لونه حتى ولو كان الضوء ساطعاً . ويمكن التأكد من هذا الامر بسهولة : ثبت نظرك في منحى معين واطلب من صديقك أن يقترب منك من الجانب حاملاً في يده أوراقاً ملونة ثم حاول تحديد لونها قبل أن تصبح أمامك مباشرة . ستكتشف أنك تستطيع رؤية الاوراق قبل تحديد لونها بكثير . ومن المستحسن أن يدخل صديقك من الطرف المعاكس للبقعة العمياء وإلا فسيحدث تشويش إذ ترى تقريباً اللون ثم لا ترى أي شيء ثم ترى اللون ثانية .

وهناك ظاهرة طريفة أخرى وهي أن حواف الشبكية حساسة جداً للحركة . فعلى الرغم من أننا لا نرى جيداً عندما ننظر من زاوية العين فإنه إذا طارت حشرة صغيرة ولم نكن نتوقع وجود أي شيء متحرك هناك ، فإننا نلاحظها فوراً لان الطبيعة جهزتنا بما يدعونا إلى النظر إلى أي شيء يهتز في طرف حقل الرؤية .

## ٣٥ - ٣ : قياس الاحساس باللون *Measuring the Color Sensation*

ننتقل الآن الى الرؤية بالمخاريط ، أي الرؤية في الضوء الساطع ، لنبحث المسألة المميزة للرؤية بالمخاريط وهي اللون . نحن نعلم أن الموشور يفرق الضوء الأبيض الى طيف كامل من الأطوال الموجية التي تبدو لنا ذات ألوان مختلفة . فهذه هي الألوان بالتأكيد: مجرد مظاهر تبدو لنا . يمكن تحليل ضوء أي منبع

بشبكة الانعراج او الموشور ، كما يمكن تحديد التوزع الطيفي أي « كمية » كل طول موجي . ومن الجائز أن يحتوي ضوء معين على كميه كبيرة من الازرق وعلى الكثير من الاحمر والقليل من الاصفر وهكذا . إن كل هذا دقيق جداً بالمعنى الفيزيائي ولكن السؤال هو : بأي لون سيبدو لنا ؟ من الواضح ان الالوان المختلفة تتوقف بشكل ما على التوزع الطيفي للضوء ولكن المشكلة هي إيجاد خصائص التوزع الطيفي التي تحدث الاحساسات المختلفة . فما السبيل مثلاً للحصول على لون أخضر ؟ نحن نعلم أنه يمكننا أخذ الجزء الاخضر فقط من الطيف . ولكن هل هذه هي الطريقة الوحيدة للحصول على الاخضر أو البرتقالي أو أي لون آخر ؟

هل هناك اكثر من توزع طيفي يستطيع إحـداث نفس الاثر البصري الظاهر ؟ الجواب قاطع وهو نعم . فعدد الاحساسات البصرية محدود جداً ، ويمكن في الواقع توليد أي إحساس بصري من مركبات ثلاث كما سنرى قريباً . بينما هناك عدد غير محدود من المنحنيات التي يمكن رسمها للضوء الصادر من منابع مختلفة . والسؤال الذي يجب بحثه هو : ضمن أي شروط تبدو توزعات الضوء المختلفة للعين كأنها نفس اللون ؟

ان أكثر الطرق النفسية ـ الفيزيائية فعـالية في الحكم على الالوان هي استخدام العين كجهاز صفري* (null instrument). أي أننا لا نحاول تعيين ما يُشكل الاحساس بالاخضر أو تحديد الظروف التي نحصل فيها على إحساس اخضر ، إذ تبين أن هذا الامر شديد التعقيد ، بل ندرس ، عوضاً عن ذلك ، الشروط التي تجعل مؤثرَين غير متمايزين (indistinguishable) . ولا ضرورة عندئذ لمعرفة ما اذا كان بوسع شخصين أن

---

* الجهاز الصفري هو الذي يحكم على تساوي مقدارين من انعدام الفرق بينهما . ( المترجمون )

يحصلا على نفس الاحساس البصري في ظروف مختلفة ، بل يكفينا أن نعلم ما اذا كان مؤثران ، يسببان إحساسين متماثلين لدى شخص ما ، يستطيعان توليد إحساسين متماثلين ايضاً لدى شخص آخر . ولا حاجة مطلقاً لمقارنة الاحساسين البصريين عند شخصين ينظران الى شيء أخضر مثلاً ، فنحن نجهل كل شيء عن هذا .

وبوسعنا ، لبيان امكانات هذه الطريقة ، ان نأخذ أربعة أجهزة إسقاط مزودة بمرشحات لونية وشدة اضاءتها قابلة للتغيير باستمرار في حدود واسعة : الجهاز الاول له مرشح أحمر و يشكل على الشاشة بقعة حمراء ، والثاني مرشحه أخضر ويعطي بقعة خضراء ، والثالث ذو مرشح أزرق . أما الرابع فيشكل على الشاشة دائرة بيضاء وفي وسطها بقعة سوداء . لنسقط الضوءين الاحمر والاخضر بحيث يتراكبان على الشاشة جزئياً فنرى ان منطقة التراكب لاتحدث إحساساً أحمر مخضراً بل لوناً جديداً هو الاصفر في الحالة الراهنة . واذا غيرنا نسب الاحمر والاخضر حصلنا على مختلف درجات البرتقالي وهلم جرا . ولو ولّدنا على الشاشة لوناً أصفر معيناً لأمكننا الحصول أيضاً على نفس هذا اللون ليس بمزج ذينك اللونين بل بمزج لونين آخرين ، ربما باستعمال المرشح الاصفر والضوء الابيض . وبعبارة أخرى يمكن توليد الالوان المختلفة بأكثر من طريقة وذلك بمزج أضواء المرشحات المختلفة .

يمكننا أن نعبّر تحليلياً عما اكتشفناه للتو كما يلي : لنرمز بـ Y الى ضوء أصفر معين ، فهو « مجموع » كميتين معينتين من ضوء المرشح الاحمر R والاخضر G . فإذا استخدمنا العددين r و g للدلالة على سطوع R و G امكننا ان نكتب من اجل الضوء الاصفر المذكور الصيغة :

$$Y = rR + gG \qquad (35-1)$$

والسؤال الآن هو : هل نستطيع توليد كافة الألوان بجمع لونين مختلفين معينين أو ثلاثة ؟ لننظر فيما يمكن قوله في هذا الصدد . ليس في وسعنا طبعاً الحصول على كافة الألوان بمزج الأحمر والأخضر فقط إذ ان الأزرق مثلاً لا يظهر أبداً في مزيج كهذا . ولكن لو أضفنا بعض الأزرق إلى البقعة المركزية ، حيث تتراكب البقع الثلاث ، لامكننا الحصول على لون أبيض تماماً . وإذا مزجنا الالوان المختلفة ونظرنا إلى البقعة المركزية وجدنا أنه يمكن ، بتغيير نسب المزيج ، الحصول على ألوان مختلفة تعطي مجالاً واسعاً جداً . ولهذا فليس من المستبعد إمكان الحصول على كافة الالوان بمزج هـذه الالوان الثلاثة . وسوف نبحث إلى أي مدى يصحّ هذا القول . فهو صحيح في الواقع من حيث الجوهر وسنصوغه بعد قليل صوغاً أفضل .

لنجعل البقع الثلاث على الشاشة تنطبق بعضاً على بعض ثم لنحاول الحصول على اللون الخاص الذي يولده الجهاز الرابع في الحلقة الدائرية المحيطة بالبقع . إن ضوء الجهاز الرابع الذي كنا نعتبره « أبيض » يبدو لنا الآن مصفراً . لنجرب الحصول على هذا اللون بمزج الاحمر والاخضر مع الازرق باتباع طريقة المحاولة والخطأ فنجد أننا نستطيع الاقتراب كثيراً من ذلك اللون ، لون « القشدة » . وعلى هذا فليس من الصعب التسليم بإمكان توليد كافة الالوان من تلك الالوان الثلاثة . سنحاول فيما بعد صنع اللون الاصفر ولكن قبل أن نفعل ذلك ، هناك لون يصعب الحصول عليه . يصنع الذين يلقون محاضرات عن الالوان كافة الالوان « الساطعة » ، إلا أنهم لا يصنعون اللون البني أبداً ، ومن العسير أن يتذكر المرء أنه رأى في حياته ضوءاً بنياً . وفي الحقيقة فإن هذا اللون لا يستعمل أبداً في الاغراض المسرحية ، ولا يشاهد أحدنا ضوءاً بنياً خارجاً من جهاز إسقاط . ويميل المرء إلى الاعتقاد باستحالة الحصول على الضوء البني . ولبيان ما إذا كان صنع البني ممكناً ، نلفت النظر إلى أننا اعتدنا ألا نرى الضوء البني

دون خلفيّة . وفي الواقع يمكن الحصول عليه بمزج بعض الاحمر مع الاصفر . وللتأكد من أننا ننظر إلى ضوء بني يكفي أن نزيد سطوع الخلفية الحلقية التي يقع ضمنها الضوء المصنوع فنرى أن ذلك هو ما نسميه بنياً ! ويبدو اللون البني قاتماً دائماً على الخلفية الفاتحة . ويمكن بسهولة تغيير طابع الضوء البني . فإذا أنقصنا مثلاً كمية الضوء الأخضر حصلنا على بني محمر بلون الشوكولا ، وإذا زدنا كمية الضوء الاخضر بنسبة معينة حصلنا على لون كريه هو لون البزات العسكرية ، وليس الضوء المولّد لهذا اللون كريهاً بحد ذاته فهو أخضر مصفر ، ولكننا نراه على خلفية قاتمة .

لنضع الآن مرشحاً أصفر على الجهاز الرابع ولنحاول الحصول على هذا الضوء بالاجهزة الثلاثة الاخرى . ( ان شدة الضوء الرابع يجب أن تكون بالطبع من مرتبة شدات المصابيح الاخرى اذ يتعذر تقليد ضوء شديد السطوع نظراً لعدم كفاية استطاعة المصابيح الاخرى) . وبالفعل نستطيع تقليد الضوء الاصفر ، وذلك بمزج الاخضر والاحمر واضافة قليل من الازرق لضبط اللون . ولعلنا الآن مستعدون للتسليم بأننا نستطيع ، في شروط مناسبة ، تقليد أي ضوء معطى تقليداً كاملاً .

لنناقش الآن قوانين مزج الالوان . قبل كل شيء ، وجدنا أنه يمكن احداث نفس اللون من توزعات طيفية مختلفة . ثم رأينا أنه يمكن صنع « أي » لون بمزج ألوان ثلاثة خاصة هي : الاحمر والازرق والاخضر . ان أهم خاصة لمزيج الالوان هي التالية : ليكن لدينا ضوء ما نسميه X فإذا بدا للعين أنه غير متمايز عن Y ( من الجائز أن يختلفا في التوزع الطيفي ولكنهما يبدوان غير متمايزين ) سمينا هذين اللونين « متساويين » بمعنى أن العين تراهما متساويين ونكتب :

$$X = Y \qquad (35-2)$$

والآن فإن أحد قوانين اللون الاساسية هو : إذا كان لدينا توزعان طيفيان غير متمايزين وأضفنا لكل منهما نفس الكمية من ضوء معين ، Z مثلاً ( معنى الكتابة X + Z هو أن الحزمتين الضوئيتين تردان مكاناً واحداً من الشاشة ) حصلنا على مزيجين جديدين غير متمايزين أيضاً أي أن :

$$X + Z = Y + Z \qquad (35 - 3)$$

لقد قلّدنا للتو ضوءنا الاصفر المعطى . فاذا أضأنا الآن الشاشة كلها بضوء أحمر وردي بقي اللونان متماثلين . أي أن إضافة أي ضوء الى ضوءين متماثلين تبقيهما متماثلين . وبعبارة أخرى نستطيع تلخيص كافة ظواهر الالوان بقولنا إذا نظرنا الى ضوءين ملونين ، متجاورين وموجودين في ظروف واحدة ، وكانا متماثلين بالنسبة الى العين فإن هذا التماثل سيبقى ويمكن الاستعاضة عن أحدهما بالآخر في أي عملية مزج ألوان . وقد تبين في الواقع ، وهذا أمر مهم ومثير ، أن تماثل الالوان لا يتوقف على خصائص العين في لحظة المشاهدة : فمن المعروف أنه إذا نظرنا لمدة طويلة الى سطح أحمر ساطع ، أو ضوء أحمر ساطع ، ثم نظرنا الى ورقة بيضاء بدت مخضرة، كما أن الالوان الاخرى تتشوه أيضاً بعد النظر الطويل إلى اللون الاحمر الساطع .

فاذا كان لدينا ضوءان متماثلان ، أصفران مثلاً . ونظرنا طويلاً الى سطح أحمر ساطع ثم عدنا ونظرنا الى الاصفر فانه لن يبدو أصفر أبداً . ولا أعلم بأي لون سيبدو إلا أنه لن يبدو أصفر . ومع ذلك فإن ضوءينا الاصفرين سيبدوان متماثلين . أي أن حكم العين على تماثل الالوان يبقى قائماً حتى عندما تتكيف العين مع سويات مختلفة من الشدة الضوئية . ويستثنى من هذا ، وضوحاً ، حالة الشدات الصغيرة التي تجعل وظيفة الرؤية تنتقل من المخاريط الى العصيات ، إذ

لا يجوز عندئذ التحدث عن مقارنة الالوان لاننا نستخدم من أجل الرؤية جملة مختلفة تماماً .

أمـا القانون الثاني في مزج الاضواء فهو : يمكن صنع أي لون بمزج ثلاثة ألوان مختلفة ( وهي في الحالة الراهنة الاحمر والاخضر والازرق ) . ونستطيع بمزج الالوان الثلاثة مزجاً مناسباً الحصول على مختلف الالوان كما بينا في مثالينا السابقين . ثم إن هذين القانونين طريفان جداً من الوجهة الرياضية . ولأولئك الذين تهمهم الناحية الرياضية نذكر مـا يلي : لنأخذ الالوان الثلاثة الاحمر والاخضر والازرق ولنرمز اليها بـ A و B و C ولنسمّهـا الالوان الأولية . يمكن عندئذ الحصول على أي لون بمزج كميات معينة من هذه الالوان الثلاثة : فمثلاً ، الكمية a من اللون A مع الكمية b من اللون B والكمية c من اللون C تصنع اللون X أي أن :

$$X = aA + bB + cC \qquad (35 - 4)$$

لنفترض الآن أن اللون Y مصنوع من الالوان الثلاثة نفسها أي :

$$Y = a'A + b'B + c'C \qquad (35 - 5)$$

فنحصل على مزيج الضوءين بجمع مركبات X و Y (وهذه إحدى نتائج القانونين المذكورين ) :

$$Z = X + Y = (a + a') A + (b + b') B + (c + c') C \qquad (35 - 6)$$

تُذكّر هذه المعادلة بقاعدة جمع المتجهات حيث (a, b, c) مركبات المتجهة الاولى و (a′, b′, c′) مركبات المتجهة الثانية ويكون الضوء الجديد Z عندئذ مساوياً « مجموع » المتجهتين . ولقد كانت هـذه النقطة دائمـاً موضع اهتمام الفيزيائيين والرياضيين . وبالفعل فقد كتب شرودنغر مقالة رائعة عن رؤية الالوان وسّع فيها نظرية التحليل المتجه من حيث تطبيقها على مزج الالوان .

والسؤال الآن هو : ما هي الألوان الأولية المناسبة الواجب استخدامها ؟ في الحقيقة ليس هناك فيما يخص مزج الاضواء انتخاب وحيد للألوان الاولية المناسبة . وقد تكون هناك ثلاثة ألوان معينة أكثر فائدة ، في الاغراض العملية من غيرها في الحصول على تشكيلة أكبر من الصّبغات بيد أننا لسنا في صدد ذلك الآن . وإن أي ثلاثة أضواء مختلفة الالوان ، أياً كانت* ، يمكن دائماً أن تمزج بالنسب الملائمة لإنتاج أي لون مهما كان . فهل نستطيع بيان هذه الحقيقة العظيمة؟ لنستخدم عوضاً عن الاحمر والاخضر والازرق في أجهزة الإسقاط الاحمر والازرق والاصفر فهل نستطيع توليد الاخضر مثلاً من الاحمر والازرق والاصفر ؟

إذا مزجنا هذه الالوان الثلاثة بنسب مختلفة حصلنا على عـــدد كبير من الالوان المختلفة تغطي طيفاً بكامله . إلا أننا نجد في الواقع ، بعد الكثير من المحاولات والاخطاء ، أنه لا يمكن الحصول على لون شبيه بالاخضر . ولكن السؤال هو هل نستطيع صنع الاخضر ؟ الجواب : نعم . كيف ؟ لو أسقطنا بعض الاحمر على الحلقة الخضراء لأمكننا جعل البقعة المركزية مماثلة لها بمزج الاصفر والازرق ! أي أننا حققنا التماثل بين البقعة والحلقة بالاحتيال على الاحمر ووضعه في الطرف الآخر . وبما أن لدينا دراية" بالحيل الرياضية فإننا ندرك أننا عوضاً عن البرهان على إمكان توليد اللون X من الاحمر والازرق والاصفر مثلاً بينا أنه بإضافة الاحمر الى اللون X نحصل على لون يمكن توليده من الازرق والاصفر . فإذا وضعنا الآن اللون الاحمر في الطرف الآخر من المعادلة أمكننا النظر اليه على أنه مقدار سالب . وعلى هذا إذا قبلنا أنه في المعـادلات من الطراز (4 — 35) يمكن للأمثال أن تكون موجبة أو سالبة ، واذا فسرنا

* باستثناء تلك الحالة ، طبعاً ، عندما يكون أحد الالوان الثلاثة ناجمـاً عن مزج الاثنين الاخرين .

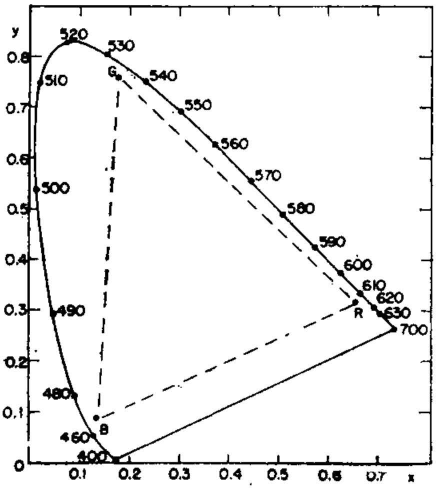
المقـادير السالبة بأنه ينبغي إضافتها إلى الطرف الآخر ، أمكن عندئذ توليد أي لون من أي ثلاثة ألوان ، واتضح لنا أنه ليس هناك ألوان أولية أساسية .

قد يخطر لنا أن نتساءل عما اذا كانت هناك ألوان ثلاثة تدخل في كافة عمليات المزج بكميات موجبة دائماً . والجواب هو النفي . فكل مجموعة من ثلاثة ألوان أولية تتطلب كميات سالبة لتشكيل بعض الالوان ولهذا لا توجد طريقة وحيدة لتعريف اللون الأولي . وتذكر الكتب المبسطة أن الالوان الاولية هي الاحمر والاخضر والازرق وما ذلك إلا لأنه يمكن بواسطتها توليد تشكيلة ألوان أوسع من غيرها دون أن تدخل الاشارات السالبة في بعض التراكيب .

## ٣٥ ــ ٤ : مخطط اللونية The chromaticity diagram

لنبحث الآن تركيب الالوان من الوجهة الرياضية على أنه انشاء هندسي . إذا أمكن التعبير عن لون ما بالمعادلة (4 — 35) أمكن تمثيله بمتجهة في الفضاء بأخذ الكميات a و b و c على ثلاثة محـــاور . عندئذ يكون هذا اللون ممثلاً بنقطة في الفضاء . وإذا كانت 'a و 'b و 'c مركبات لون آخر وقعت النقطة الممثلة له في وضع آخر وبجموع هـذين اللونين هو ، كما نعلم ، اللون الناشىء من جمعها جمعـاً متجهاً . ومن الممكن تبسيط هذا المخطط وتمثيل كل شيء في المستوي بالاستفادة من الملاحظة التالية : اذا كان لدينـــا ضوء من لون معين وضاعفنا a و b و c ، أي زدنا قيمها مع المحافظة على النسب فيما بينها ، حصلنا على نفس اللون انما بسطوع أشد . وبالتالي إذا اصطلحنا على خفض كل الالوان الى نفس الشدة الضوئية أمكننا إظهار خصائصها في المستوي ،ونتيجة هذه العملية هي الشكل ( ٣٥ — ٤ ) . ينجم عن ذلك أن أي لون يتولد من مزج لونين

معينين بنسبة ما يكون ممثلاً بنقطة تقع على المستقيم لواصل بين النقطتين الممثلتين




الشكل ( ٣٥ — ٤ )

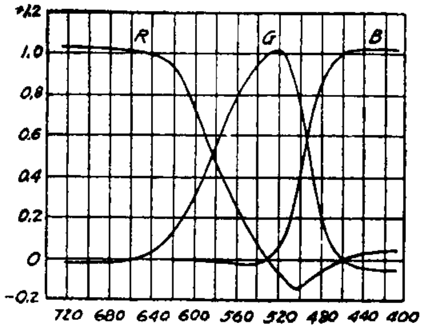
مخطط اللونية العياري

The standard chromaticity

للونين. فيقع مثلا المزيج المؤلف من قسمين متساويين في منتصف المسافة بينهما. أما المزيج المؤلف من $\frac{١}{٤}$ من أحدهما و $\frac{٣}{٤}$ من الآخر فيقع على بعد من الاول قدره $\frac{١}{٤}$ المسافة بينهما وهكذا . واذا استخدمنا الازرق والاخضر والاحمر كالوان أولية رأينا أن كافة الالوان التي يمكن توليدها منها باستخدام أمثال موجبة تقع ضمن المثلث المنقط الذي يشتمل تقريباً على كل الالوان التي نستطيع رؤيتها ، لأن كافة الالوان التي نستطيع رؤيتها محصورة في المساحة الغريبة الشكل المحدودة بالمنحني . ولكن ما منشأ هذه المساحة ؟ لقد ركب شخص ما ذات مرة بعناية فائقة جميع الالوان المرئية من ثلاثة ألوان خاصة . وليس من الضروري فحص كافة الالوان المرئية بل علينا أن نفحص الالوان الطيفية الصافية فقط ، أي الخطوط الطيفية . يمكن النظر إلى أي ضوء على أنه مجموع كميات

موجبة مختلفة من الالوان الطيفية الصافية المختلفة ( الصافية من وجهـــة النظر الفيزيائية ) . فإذا اعتبرنا ضوءاً معيناً فانه يتألف من كميات معينة من ألوان الطيف : الاحمر والاصفر والازرق ... الخ . وبالتالي إذا علمنا كميات الألوان الأولية التي انتخبناها اللازمة لصنع كلٍ من هـــذه المركبات الصافية استطعنا حساب ما يلزمنا منها لصنع اللون المعطى . فإذا حددنا لكافة الألوان الطيفية أمثال اللون الخاصة بثلاثة ألوان أولية معطاة استطعنا وضع جدول كامل لمزج الألوان .

يبين الشكل (٣٥ – ٥) مثالاً على المعطيات التجريبية الخاصة بمزج ثلاثة أضواء . فهو يبين كمية كل من الألوان الأوليةالثلاثة المختلفة ، الاحمر والاخضر والازرق ، اللازمة لصنع كل من الالوان الطيفية . يقع الاحمر عند نهايةالطيف اليسرى ثم يليه الاصفر وهكذا حتى الازرق . لاحظ أنه في بعض الحالات تكون الإشارات السالبة ضرورية . وان أمثال هذه المعطيات بالذات هي التي تسمح بتعيين مواقع النقاط العائدة لكافة الالوان على المخطط إذ ترتبط قيمتا




الشكل (٥-٣٥)

أمثال اللون للألوان الطيفية الصافية بدلالة مجموعة معينة من الألوان الأولية العيارية

The color coefficients of pure spectral colors in terms of certain set of standard primary colors.

الإحداثيين x و y بكميات مختلف الالوان الاولية المستعملة . وبهذه الطريقة تم إيجاد المنحني الحدي على المخطط ، وهو يمثل المحل الهندسي للألوان الطيفية الصافية . ويمكن طبعاً صنع أي لون آخر بمزج الخطوط الطيفية ولهذا فإن أي اون يمكن توليده بوصل نقطة من المنحني إلى أخرى هو لون موجود في الطبيعة . ويصل الخط المستقيم على المخطط نهاية الطيف البنفسجية القصوى بنهايته الحمراء القصوى ، وهو المحل الهندسي للألوان الارجوانية . وتقع ضمن المنحني الالوان التي يمكن صنعها بواسطة الضوء ، أما خارجه فتقع الالوان التي يتعذر توليدها بواسطة الضوء والتي لم يرها أحد قط ( اللهم إلا إذا كان ذلك إحساساً بصرياً تخلّف بعد زوال الضوء المنبه ! ) .

## ٣٥ — ٥ : آلية رؤية الالوان *The mechanism of color vision*

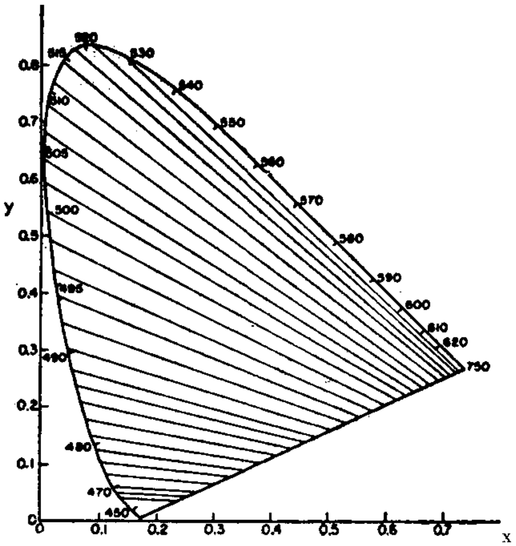
والآن فإن الوجه الثاني للقضية هو السؤال : لماذا تتصرف الالوان على هذا النحو ؟ تفترض أبسط نظرية ، وهي التي اقترحها يانغ وهلمهولتس ، أنه يوجد في العين ثلاث صبغات مختلفة تتلقى الضوء وأن لهذه الصبغات طيوف امتصاص مختلفة بحيث أن احداها تمتص بشدة في المنطقة الحمراء مثلاً بينما تمتص الاخرى بشدة في المنطقة الزرقاء وتمتص الثالثة في منطقة الاخضر . وعندما يأتيها الضوء يحدث الامتصاص في المناطق الثلاث وتختلف شدته من منطقة لاخرى ، ويجري تحليل هذه المعلومات ، الآتية من ثلاثة مصادر ، في الدماغ أو العين أو في مكان ما لتقرير لون الضوء . ومن السهل البرهان على أن كافة قواعد مزج الالوان هي نتيجة لهذا الافتراض الذي جرت حوله مناقشات كثيرة . ذلك أن المسألة التالية هي ، بطبيعة الحال ، ايجاد خصائص الامتصاص لكل من الصبغات الثلاث . وقد تبين أنه يمكن ايجاد كافة أنواع التراكيب الخطية لمنحنيات الامتصاص من تجارب مزج الالوان بينما يتعذر ، لسوء الحظ ، ايجاد المنحنيات للصبغات كل

على حدة ، والسبب هو اننا نستطيع تحويل إحداثيات الالوان كما نشاء. وقد حاول الباحثون ، بمختلف السبل ، الحصول على منحن مميز يصف فعلاً إحدى الخواص الفيزيائية المهمة للعين . ويبين الشكل ( ٣٥ – ٣ ) أحد هذه المنحنيات المسمى منحني السطوع . ونرى على الشكل منحنيين أحدهما للعين الموجودة في الظلام والآخر للعين الموجودة في النور ، وهذا الاخير هو منحني السطوع للرؤية بالمخاريط . وقد حُصل عليه بتعيين الكمية الصغرى من الضوء الملون الذي تحتاجه العين لتكون قادرة على مجرد الاحساس به . وهو يقيس حساسية العين في مختلف المناطق الطيفية . وهناك طريقة أخرى طريفة جداً لقياس الحساسية . لنأخذ لونين ولنجعلهما يظهران بالتناوب على الشاشة . فإذا كان تواتر ظهورهما صغيراً رأينا إضاءة متقطعة. ولكن بازدياد التواتر يختفي التقطع في النهاية من أجل تواتر تتوقف قيمته على سطوع الضوء وليكن هذا التواتر 16 مرة في الثانية مثلا. فإذا عدّلنا الآن سطوع أو شدة أحد اللونين بالنسبة إلى الآخر وجدنا الشدة التي تجعل التقطع يختفي من أجل التواتر 16 مرة . فإذا أبقينا هذه الشدة على حالها وأردنا الحصول على التقطع وجب علينا خفض التواتر كثيراً لنرى تقطع اللون . وهكذا فإننا نحصل ، عندما يكون التواتر أكبر من 16 ، على ما نسميه تقطع السطوع ، أما إذا كان التواتر أصغر من 16 فنحصل على تقطع اللون . ويمكن ، باتباع طريقة التقطع هذه ، انتقاء لونين « متساويين في السطوع » . والنتائج التي نحصل عليها بهذه الطريقة تماثل تقريباً ، وليس تماماً ، تلك التي نحصل عليها بقياس عتبة إحساس العين كي ترى بالمخاريط الضوء الضعيف . ويستخدم معظم الباحثين جهاز التقطع كتعريف لمنحني السطوع .

والآن إذا كانت العين تحتوي على ثلاث صبغات فإن المسألة هي تعيين شكل طيف الامتصاص لكل منها . فما السبيل إلى ذلك ؟ من المعروف أن هناك أُناساً مصابين بعمى الالوان وهم يشكلون ثمانية بالمئة من الرجال ونصف بالمئة من

النساء . وتكون درجة الحساسية لتغير اللون ، عند المصابين بعمى الالوان أو بشذوذ في رؤية الالوان ، مختلفة عنها عند الآخرين ، ومع ذلك فإنهم بحاجة الى ثلاثة ألوان أيضاً لتركيب الالوان الاخرى . ولكن هناك من يحتاج إلى لونين أوليين فقط لتركيب أي لون آخر ، ويسمى هؤلاء ثنائيي اللون . ومن الطبيعي أن نفترض أنه تنقصهم إحدى الصبغات الثلاث . فإذا استطعنا إيجــاد ثلاثة أصناف من الناس الثنائيي اللون وجب أن تنقص الصنف الاول الصبغة الحمراء والثاني الخضراء والثالث الزرقاء . وبقيـاس الاحساس اللوني لدى الاصناف الثلاثة نجد المنحنيات الثلاثة ! ولقد تبين أن هناك فعلاً ثلاثة نمـاذج من عمى الالوان الثنائي ، اثنان منها شائعان والثالث نادر جداً ، ومن هذه النماذج الثلاثة أمكن استنتاج طيوف امتصاص الصبغات .

يبين الشكل ( ٣٥ - ٦ ) مزج الالوان عند نموذج خاص من الاشخـاص



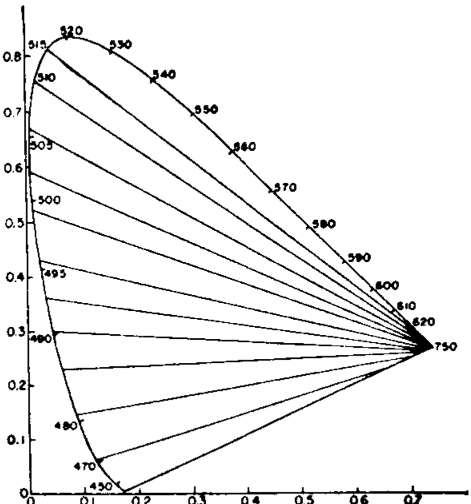

الشكل ( ٣٥ - ٦ )

المحلات الهندسية للالوان التي يخلط بينها المصابون بعيب الرؤية الثنائي

*Loci of colors confused by deuteranopes.*

المصابين بعمى الالوان يطلق عليهم اسم « المصابين بعيب الرؤية الثنائي » . فبالنسبة لأحدهم لا يكون المحل الهندسي للألوان الثابتة عبارة عن نقاط بل خطوط معينة يبدو اللون على طول كل منها ثابتاً . ولو صحت نظرية افتقاد أحدهم لأحد المصادر الثلاثة للمعلومات لوجب أن تلتقي جميع هذه الخطوط في نقطة . فإذا أجرينا القياس بعناية على المخطط البياني وجدنا أنها تلتقي فعلاً في نقطة واحدة . وهذا يعني ، وضوحاً ، أن المخطط البياني ( ٣٥ – ٦) هو نتيجة حسابات رياضية ولا يمثل معطيات حقيقية ! وفي الواقع لو اطلعنا على المعطيات الحقيقية في أحدث نشرة علمية لتبين لنا أن نقطة تجمع كافة الخطوط على الشكل (٣٥ – ٦) ليست بالضبط حيث يجب أن تكون . أي أن استخدام خطوط الشكل المذكور لا يسمح بإيجاد طيوف مقبولة ، فهناك حاجة لامتصاص سالب وموجب في المناطق المختلفة . ولكن معطيات يوستوفا الحديثة تبين أن كلاً من منحنيات الامتصاص موجب في كافة المناطق .

يبين الشكل (٣٥ – ٧) نوعاً آخر من عمى الألوان ، يسمى صاحبه

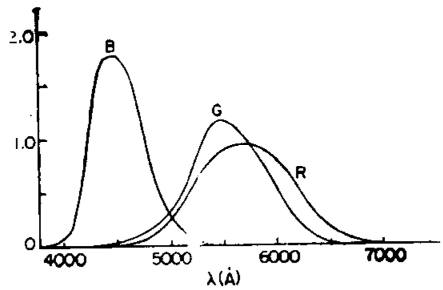



الشكل (٣٥ – ٧)

المحلات الهندسية للألوان التي يخلط بينها المصابون بعيب الرؤية الاحادي

Loci of colors confused by protanopes.

« المصاب بعيب الرؤية الاحادي » وتكون فيه نقطة التلاقي قرب النهاية الحمراء من المنحني . وقد حصل يوستوفا في هذه الحالة على نفس النقطة تقريباً . وباستخدام الانواع الثلاثة لعمى الالوان أمكن في النهـــاية تعيين منحنيات الاستجابة للصبغات الثلاث وهي المبينة على الشكل (٣٥ – ٨) . ولكن هل هذه المنحنيات نهائية ؟ ربما .




الشكل ( ٣٥ – ٨ )

منحنيات الحساسية الطيفية للعين التي تتحسس بالالوان الأولية الثلاثة تحسساً طبيعياً

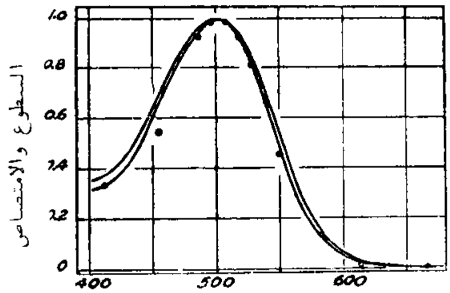
The spectral sensitivity curves of anormal trichromat's receptors.

فالسؤال مفتوح حول صحة فكرة الصبغات الثلاث ، وعما إذا كان عمى الالوان ناشئاً من فقدان احدى الصبغات ، وحتى حول صحـة معطيات مزج الالوان في حالة العمى اللوني . فقد حصل باحثون مختلفون على نتائج مختلفة وما تزال هذه المسائل قيد البحث الواسع .

## ٣٥ ـــ ٦ : الخواص الفيزيائية الكيميائية لرؤية الالوان

والآن ماذا نستطيع أن نقول عن مقارنة هذه المنحنيات بخواص الصبغات الحقيقية في العين ؟ تتألف الصبغات التي يمكن الحصول عليها من الشبكية ، في

الدرجة الاولى ، من صبغة تسمى الارجوان البصري . وأكثر خصائصه لفتاً للنظر هي : أولا أنه موجود في عيون جميع الحيوانات الفقارية تقريباً ، وثانياً أن منحني استجابته يكاد ينطبق على منحني حساسية العين كما هو ظاهر على الشكل ( ٣٥ – ٩ ) الذي رسم عليه بنفس المقياس منحني امتصاص الارجوان




طول الموجة (mμ)

الشكل ( ٣٥ – ٩ )

منحني حساسية العين ، التي ألفت الظلام ، بالمقارنة مع منحني امتصاص الارجوان البصري

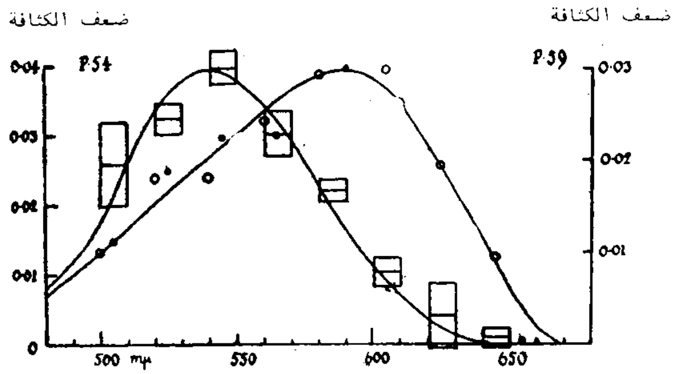
The sensitivity curve of the dark-adapted eye, compared with the absorption curve of visual purple

البصري ومنحني حساسية العين التي ألفت الظلام . ومن الواضح أننا نرى في الظلام بفضل هذه الصبغة : فالارجوان البصري هي صبغة العصيات ولا علاقة له برؤية الالوان . وقد اكتشفت هذه الحقيقة في عام ١٨٧٧ . وفي وسعنا أن نقول ، حتى في أيامنا هذه، أن الصبغات اللونية للمخاريط لم تعزل قط في أنبوب الاختبار . وكان بالامكان القول ، عام ١٩٥٨ ، أن الصبغات اللونية لم يرها أحد إطلاقاً . ولكن منذ ذلك التاريخ اكتشف راشتون اثنتين منها بطريقة بسيطة جداً وبديعة .

ومنشأ الصعوبة ، كما يفترض ، هو أن العين تحتاج لكي ترى ، إلى كمية كبيرة من الارجوان البصري في حين أنها لا تحتاج الى الكثير من الصبغات اللونية كي ترى الالوان ، وذلك لأن حساسية العين للضوء الساطع أضعف بكثير من

حساسيتها للضوء الضعيف الشدة . وتتلخص فكرة راشتون في إبقاء الصبغة في العين وتعيين خواصها هناك مع ذلك . وقد قام راشتون بما يلي : هناك جهاز يسمى كاشف العين ( معيان ) يرسل الضوء الى باطن العين عبر عدستها ثم يجمّع الضوء الخارج منها . ويمكن بواسطته قياس كمية الضوء المنعكس وبذلك يقاس معامل الانعكاس للضوء الذي اجتاز الصبغة مرتين ( إذ ينعكس الضوء على الطبقة الخلفية لكرة العين ثم يخرج مجتازاً صبغة المخاريط مرة ثانية ) . وليست الطبيعة مرتبة دائماً بهذا الشكل البديع . فقد صممت المخاريط تصميماً مثيراً بحيث أن الضوء الذي يدخل المخروط يرتد ضمنه هنا وهناك شاقاً لنفسه طريقاً حتى يبلغ النقاط الحساسة الصغيرة عند ذروة المخروط فيتوغل في هذه النقاط الى أن يرتد عن قاع العين عائداً نحو الخارج بعد أن يكون قد اجتاز مساراً طويلاً في صبغة الرؤية الملونة . ثم اننا اذا نظرنا الى النقيرة المركزية ، حيث لا يوجد عصيات ، فإن الارجوان البصري لا يشوشنا . وقد أمكن رؤية لون الشبكية منذ زمن طويل : وهو ضرب من القرنفلي البرتقالي ، ثم هناك الاوعية الدموية المختلفة ، ولون الجدار الخلفي للعين وهكذا . ولكن كيف نعلم أننا ننظر الى الصبغة ؟ الجواب : ندرس في البداية شخصاً مصاباً بعمى الالوان إذ لديه من الصبغات عدداً أقل وبالتالي يكون تحليل النتائج أسهل . ثم إن الصبغات المختلفة ، كالارجوان البصري ، تغير تركيزها عندما يسقط عليها ضوء أبيض شديد ولهذا أدخل راشتون ، عندما كان يدرس طيف امتصاص العين ، حزمة ثانية إلى العين بكاملها لتغيير تركيز الصبغات ، ثم قاس تغير الطيف ؛ وبالطبع لا علاقة للفرق بكمية الدم او لون الطبقات العاكسة وما شاكل ذلك بل يتوقف على الصبغة فقط . وقد حصل راشتون بهذه الطريقة على منحني الامتصاص لصبغة عين شخص « مصاب بعيب الرؤية الاحادي » ويبين الشكل ( ٣٥ - ١٠ ) هذا المنحني .

أما المنحني الثاني على الشكل ( ٣٥ — ١٠ ) فقد حُصل عليه من دراسة عين سليمة كما يلي : يعين اولاً نوع إحدى الصبغات ثم تضاء الصبغة الاخرى بالاحمر الذي تكون الاولى غير حساسة له . إن الضوء الاحمر لا يؤثر على عين الاحادي بينما تتأثر به العين السليمة فيمكن إذن الحصول على منحني امتصاص الصبغة المفقودة . ويتفق شكل أحد المنحنيين اتفاقاً جيداً مع منحني يوستافا للصبغة الخضراء . أما منحني الصبغة الحمراء فإنه منزاح قليلاً . ولهذا من المحتمل أن يكون مسلكنا صحيحاً . كما يجوز ألا يكون إذ أن آخر الدراسات التي أجريت على الثنائيين لا تشير الى فقدان أي صبغة معينة .




الشكل ( ٣٠ — ١٠ )

Pigment

طيف الامتصاص في الصبغة اللونية لعين شخص

« مصاب بعيب احادي » ( المربعات ) ، وعين سليمة ( النقاط )

normal eye — protanpe Color-blind eye

ليس اللون من مواضيع فيزياء الضوء نفسه بل هو إحساس . ويختلف الإحساس الناشيء عن مختلف الألوان باختلاف الظروف . فإذا أخذنا ضوءاً وردياً مثلاً ناشئاً من انضمام حزمتين متقاطعتين من الضوء الأبيض والاحمر ( من الواضح أن الابيض والاحمر لا يعطيان سوى الوردي ) أمكننا أن نبين كيف يبدو الضوء الابيض أزرق . إذ لو وضعنا جسماً في طريق الحزمتين لألقى ظلين

أحدهما مضاء بالضوء الابيض فقط والآخر مضاء بالاحمر . ويبدو الظل « الابيض » لمعظم الناس أزرق . ولكن لو جعلنا هذا الظل يكبر حتى يغطي الشاشة بكاملها لرأينا أنه يبدو فجأة أبيض وليس أزرق ! وكذلك فإن مزج الضوء الاحمر مع الاصفر والابيض لا يعطي سوى الاضواء الصفراء البرتقالية . وهكذا فإذا مزجنا هذه الاضواء بنسب متساوية تقريباً حصلنا على ضوء برتقالي فقط . ويمكن مع ذلك ، بتشكيل ظلال مختلفة داخل الضوء ذات تراكب لوني متنوع ، الحصول على سلسلة من الالوان الجميلة غير الموجودة في الضوء نفسه ( الحاوي على البرتقالي فقط ) بل في إحساسنا . فنحن نرى بوضوح ألواناً عديدة مختلفة لا تشبه أبداً الالوان « الفيزيائية » في الحزمة . ومن المهم جداً أن ندرك أن الشبكية تبدأ « التفكير » في الضوء . فهي تقارن ، دون وعي منها ، بين ما تراه في منطقة وما تراه في منطقة أخرى . أما ما نعلمه عن كيفية قيامها بهذا العمل فيشكل موضوع الفصل التالي .

★ ★ ★

# الفصل السادس والثلاثون

# آليات الرؤية

*Mechanisms of Seeing*

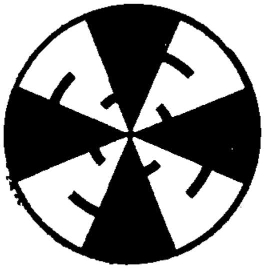
## ٣٦ ـ ١ : الإحساس باللون *The sensation of color*

عند مناقشة حاسة الرؤية ، علينا أن نعي أننا لا نرى ( خارج مجال معرض الفن الحديث ! ) بقعاً عشوائية من اللون أو الضوء ، وإنما نرى رجلاً أو شيئاً عندما ننظر الى جسم ما ، وبكلام آخر فإن المخ يُترجم ما نرى . كيف يفعل ذلك لا أحد يعلم ، وهو يقوم بها على مستوٍ عالٍ جداً . وعلى الرغم من أننا لا نتعلم أن نميز كيف يبدو الرجل إلا بعد خبرة طويلة ، فإن هناك عــدداً من مظاهر الرؤية أكثر بدائية ولكنها تتضمن أيضاً تركيب معلومات من أجزاء مختلفة مما نرى . وحتى يسهل علينا فهم كيف نترجم خيالاً كاملاً من المفيد أن ندرس المراحل الاولية لوضع المعلومات الواردة من خلايا الشبكية المختلفة مع بعضها وسنركز اهتمامنا في هذا الفصل على هذا الجانب من موضوع الرؤية بصورة رئيسية ، على الرغم من أننا سنذكر عدداً من المواضيع الجانبية خلال ذلك .

وكمثال على حقيقة تراكم المعلومات الآتية من أجزاء متعددة من العين في نفس الوقت وعلى مستوٍ بدائي جداً خارج عن سيطرتنا أو قدرتنا على التعلم ، هو ظهور الخيال الازرق عن الضوء الابيض عندما نسلط ضوءاً أبيض وضوءاً أحمر على شاشة واحدة . ويتضمن هذا الأثر على الاقل معرفة أن لون أرضية

الشاشة هو احمر وردي ، رغم أنه عندما ننظر الى الخيـال الازرق ، يصل الى نقطة معينة من العين ضوء « ابيض » فقط ؛ وتفسير ذالك إذن أنه في مكان ما قد ركبت أجزاء المعلومات بعضها مع بعض . وكلما كان المنظور أكمل ومألوفاً أكثر ، كلما قامت العين بتصحيحات أكثر في شأن خصوصياته. وفي الحقيقة فقد بين لاند أنه إذا مزجنا ذلك الازرق الظاهر مع الأحمر بنسب مختلفة ، وذلك باستعمال شفوفيتين تصويرتين وبوجود مرشحات أمـام الضوء الاحمر والابيض بنسب مختلفة، فإنه من الممكن جعلها تمثل مشهداً حقيقياً وبأجسام حقيقية بأمانة جيدة . ونحصل في هذه الحالة على عدد كبير من الالوان الظاهرية المتوسطة أيضاً ، كتلك التي نحصل عليها بمزج الاحمر مع الازرق المخضر ، وتبدو كأنهـا مجموعة كاملة من الالوان تقريباً ، لكنه إذا أمعنا النظر بها تماماً فإنها ليست بهذه الجودة . ومع ذلك فإنه من المستغرب أننا نحصل على هـذا القدر من التلوين باستخدام الضوء الاحمر والابيض فقط . وكلما اقترب المشهد من الحالة الحقيقية ، كلما استطاع المرء أن يعوض عن حقيقة كون كل الضوء احمر وردياً فقط !

وثمة مثال آخر هو ظهور « الألوان » في قرص أبيض واسود دائر ، فيه مساحات بيضاء وسوداء كما في الشكل(٣٦ – ١). فعندما يدوَّر القرص تكون



الشكل ( ٣٦ – ١ )

عندما ندوِّر قرصاً كالمرسوم في الأعلى تظهر ألوان في احدى « الحلقتين » السوداوين فقط . وإذا عُكس اتجاه الدوران تظهر الالوان في الحلقة الاخرى

تغيرات الإضاءة والظلام بالنسبة لأي نصف قطر هي نفسها تماماً ، غير أن الأرضية تختلف بالنسبة الى نوعي «الشريطين» فقط. إلا أن إحدى الحلقتين تبدو ملونة بلون أول وتبدو الأخرى بلون آخر* . وحتى الآن لا نستطيع فهم سبب هذين اللونين ، لكنه من الواضح أن المعلومات تُجمع مع بعضها على مستوٍ بدائي جداً ، وفي العين نفسها على الأغلب .

تتفق كل النظريات الحديثة الرؤية الملونة تقريباً ، على أن معلومات المزج اللوني تشير الى وجود ثلاثة أنواع فقط من الصبغات في مخاريط العين ، وإلى أن الامتصاص الطيفي في هذه الصبغات هو الذي يُنتج احساس اللون بصورة أساسية. غير أن الاحساس الكلي المرافق لخواص الإمتصاصات في الصبغات الثلاثة عندما تعمل معاً لا يكون بالضرورة مجموع الاحساسات الفردية. فالكل يوافق أن الاصفر لا يبدو أخضر محمراً ، وقد تكون في الواقع مفاجأة كبيرة لمعظم الناس أن تكتشف أن الضوء هو مزيج من الالوان ، لان الاحساس بالضوء ينتج عن عملية غير بسيطة فهي لا تشبه المزج البسيط للنغمات في الوتر الموسيقي ، حيث تكون النغمات الثلاث موجودة في نفس الوقت واذا أنصتنا وأرهفنا السمع فإننا نستطيع سماعها فرادى . أما في الضوء ، فإننا لا نستطيع رؤية الاحمر والاخضر إذا أمعنا النظر بحدة .

كانت النظريات الاولية في الرؤية تذهب إلى وجود ثلاث صبغات وثلاثة أنواع من المخاريط ، كل نوع يحتوي صبغاً معيناً ، والى أن هناك عصباً يمضي من كل مخروط الى الدماغ ، بحيث أن قطع المعلومات الثلاث تحمل الى الدماغ ، وهناك في الدماغ يمكن أن يحدث أي شيء . إن هذه طبعاً فكرة غير كاملة ، فلا ينفعنا اكتشاف أن المعلومات تُحمل عبر العصب البصري الى الدماغ ، لاننا

---

* يتعلق اللونان بسرعة الدوران ، وبسطوع الإضاءة ، وإلى حد ما بالشخص الناظر وبمدى إمعانه النظر فيهما .

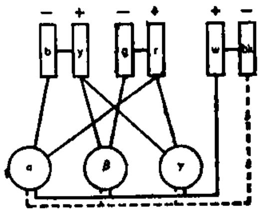
لم نبدأ بعد بحل المشكلة . وعلينا أن نسأل أسئلة أكثر أساسية مثل : هل لموضع جمع المعلومات أي شأن يذكر ؟ وهل من المهم أن تحمل مباشرة الى الدماغ بالعصب البصري ، أو أنه يمكن للشبكية أن تقوم ببعض التحليل أولاً ؟ فقد رأينا صورة للشبكية كشيء معقد جداً مع كثير من الوصلات الداخلية ، انظر الشكل (٣٥ — ٢) ، فقد تقوم إذن ببعض التحليل .

وفي الحقيقة إن الذين يدرسون التشريح وتطوّر العين بينوا أن الشبكية هي في الواقع الدماغ : ففي تطور الجنين تتقدم قطعة من الدماغ الى الامام وتنمو خيوط طويلة نحو الخلف تصل العينين بالدماغ . وتعضي الشبكية هو تعضي الدماغ نفسه ، وكما وصفها أحدهم ببراعة « لقد شق الدماغ طريقاً له الى الخارج لينظر منه الى العالم » . فالعين هي جزء من الدماغ يلامس الضوء في الخارج . لذلك فليس من الغريب أن يجري بعض التحليل في اللون في الشبكية .

وتعطينا هذه فرصة مثيرة جداً . فليس من بين الحواس الاخرى ما تجري هذا المقدار العظيم من الحساب ، إذا صح القول ، قبل أن تصل الاشارة الى عصب نستطيع أن نجري قياساً عليه . إذ تحدث الحسابات عادة من أجل بقية الحواس في الدماغ نفسه ، حيث يكون من الصعب جداً الوصول الى أمكنة معينة نستطيع إجراء القياسات عندها ، لان هناك وصلات داخلية كثيرة جداً . فلدينا هنا في حاسة الرؤية الضوء وثلاث طبقات من الخلايا تقوم بالحسابات ثم ترسل نتائج الحسابات عبر العصب البصري فربما يكون لدينا الفرصة الاولى هنا كي نشاهد وظيفياً كيف تعمل الطبقات الاولى من الدماغ في المراحل الاولى . لذلك فإن أهميتها مضاعفة فهي ليست هامة بالنسبة للرؤية فقط لكنها تهمنا بالنسبة لمسألة علم وظائف الاعضاء ( الفيزيولوجيا ) أيضاً .

لا تعني حقيقة وجود ثلاثة أنواع من الصبغات وجوب وجود ثلاثة انواع

من الاحساسات. فإحدى نظريات الرؤية الملونة الاخرى تقول بوجود مخططات عمل لونية كالمبينة في الشكل (٣٦-٢) . أي أن احد الالياف العصبية يحمل نبضات




$$\begin{cases} y - b = k_1 (\beta + \gamma - 2\alpha) \\ r - g = k_2 (\alpha + \gamma - 2\beta) \\ w - bk = k_3 (\alpha + \gamma + \beta) - k_4 (\alpha + \beta + \gamma) \end{cases}$$

الشكل (٣٦ - ٢)
الوصلات العصبية وفق نظرية الرؤية الملونة « المضادة »

كثيرة عندما نرى لوناً أصفر ، وأقل من المعتاد من أجل اللون الازرق . ويحمل ليف عصبي آخر معلومات الاخضر والاحمر بنفس الطريقة ، وليف ثالث للأبيض والاسود . وبكلام آخر فقد بدأ بعضهم في هـذه النظرية يخمن شكل وصل الدارات وطريقة الحساب .

إن المسائل التي نحاول حلها بتخمين كيفية حدوث الحسابات الاولى هي اسئلة حول الالوان الظاهرية التي نراها على أرضية حمراء وردية ، وماذا يحدث للعين عندما تتعود على ألوان مختلفة ، وحول ما يسمى الظواهر النفسية أيضاً . فطبيعة الظواهر النفسية مثلاً ، تتضمن أن « الإحساس » بالابيض لا يشبه الاحساس بالاحمر أو الاصفر أو الازرق ، وقد ظهرت هذه النظرية لأن علماء النفس يقولون بوجود أربعة ألوان ظاهرية نقية : « هناك أربعة مهيجات لهـا قابلية ملحوظة في تحريض ألوان نفسية بسيطة للأزرق والاصفر والاخضر والاحمر متدرجـة بالترتيب . فهذه الالوان البسيطة تختلف عن لون صدئي* او

* صدئي ( Sienna ) صباغ مكون من طين يلونه الحديد والمنغنيز ويستخدم في الصباغة . ( المترجمون )

قرصدي* أو أرجواني او أكثر الالوان الاخرى القابلة للتمييز في أنها إحساسات غير مخلوطة ،بمعنى أن أي لون لا يختلط بسواه أي ليس فيه شيء من طبيعة لون آخر، وبالتحديد فهذا يعني أن الازرق ليس مصفراً أو محمراً أومخضراً وهكذا ، فهي ألوان أولية من وجهة النظر النفسية». وهذه حقيقة نفسية كما تسمى. وحتى نجد ما يؤيد كيفية استنتاج هذه الحقيقة النفسية علينا أن نبحث في كل ما هو منشور وأن نبذل جهداً شاقاً جداً . فكل ما نجد في الكتب الحديثة في هذا الموضوع هي إعادات للجملة نفسها أو إعادة جملة أخرى لعالم نفسي ألماني يورد ليوناردو دافنشي كواحد من مراجعه ، ونعلم أن ليوناردو دافنشي كان فناناً عظيماً . فيقول العالم الالماني ، « كان ليوناردو يعتقد أن هناك خمسة ألوان » . وإذا تابعنا البحث نجد في كتاب أقدم قليلاً حول نفس الموضوع. فيقول الكتاب مثلاً : « الارجواني هو أزرق محمر ، والبرتقالي اصفر محمر ، لكن هل يمكن للأحمر أن يكون برتقالي أرجواني ؟ أفليس الاحمر والاصفر أكثر وحدانية من الارجواني والبرتقالي ؟ وإذا طُلب الى شخص عادي أن يحدد الالوان الوحدانية فانه يسمي الاحمر والاصفر والازرق ويضيف بعضهم لوناً رابعاً هو الاخضر . وقد تعود علماء النفس قبول الاربعة على أنها الالوان البارزة . وهكذا يكون الوضع من وجهة نظر التحليل النفسي كما يلي: إذا قال كل شخص بوجود ثلاثة ، وقال بعضهم بوجود أربعة واذا ارادوا ان تكون أربعة فستكون أربعة وهذا يبين الصعوبة في البحوث. فمن الواضح اننا نملك احساسات من هذا النوع ، لكنه من الصعب جداً الحصول على معلومات حول هذه الاحساسات .

ويكون الاتجاه الآخر الواجب اتباعه هو الاتجاه الفيزيولوجي وهو أن نجد

---

* قرصدي ( magenta ) صباغ براق احمر مزرق ، صيغته الكيميائية $C_{20}H_{22}N_{3}OCl$ . ( المترجمون )

تجريبياً ماذا يحدث فعلاً في الدماغ ، وفي العين ، وفي الشبكية ، أو في أي مكان آخر ، وربما أن نكتشف أن بعض تراكب النبضات الصادرة عن خلايا مختلفة تتحرك على طول بعض الألياف العصبية . ولنذكر بالمناسبة أنه ليس من الضروري أن تكون الصبغات الاولية في خلايا منفصلة ، فيمكن أن يكون في بعض الخلايا خليط من الصبغات المختلفة ، كخلايا تحتوي على صبغات حمراء وخضراء ، أو خلايا تحتوي على الانواع الثلاثة ( فمعلومات الثلاثة مع بعضها تكون معلومات لونها أبيض ) ، وهكذا . وإن هناك طرقاً عديدة لوصل أجزاء الجملة بعضاً ببعض ، وعلينا أن نجد الطريقة التي تستخدمها الطبيعة . ونأمل في النهاية ، بعد ان نفهم الصلات الفيزيولوجية ، ان يتكون لدينا تفهم افضل لبعض نواحي علم النفس ، لذا سنبحث في هذا الاتجاه .

## ٣٦ ــ ٢ : فيزيولوجيا العين *The physiology of the eye*

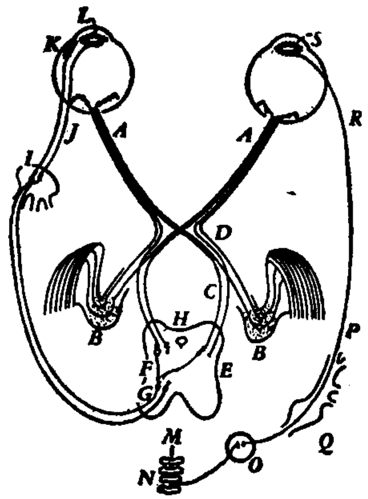
نبدأ بالكلام عن الرؤية بصورة عامة وليس الكلام عن رؤية الالوان فقط ، ولنذكّر أنفسنا بالصلات الموجودة في الشبكية المبينة في الشكل (٣٥ - ٢) . تشبه الشبكيــة في الواقع سطح الدماغ . وعلى الرغم من أن الصورة الحقيقية من خلال المجهر تبدو أكثر تعقيداً قليلاً من الرسم المختصر ، فإننا نستطيع بالتحليل الدقيق أن نرى هذه الصلات الداخلية كلها . وليس هناك من شك أن أحد أجزاء سطح الشبكية مرتبط بالاجزاء الاخرى ، وأن المعلومات التي تخرج عبر المحاور الاسطوانية الطويلة التي يتألف منها العصب البصري هي مجموع المعلومات من خلايا عديدة . وتوجد ثلاث طبقات من الخلايا تعمل على التتابع : فهناك الخلايا الشبكية وهي التي يؤثر فيها الضوء ، والخلايا المتوسطة التي تأخذ المعلومات من خلية أو بضع خلايا شبكية وتعطيها ثانية الى خلايا متعددة في طبقة ثالثة من الخلايا ، وتحمل هذه الخلايا الاخيرة المعلومات الى الدماغ . كما توجد كل أنواع

الاتصالات المتصالبة بين الخلايا في الطبقات .

نعرّج الآن على بعض مظاهر بُنْية العين وأدائها ، انظر الشكل (٣٥-١) . يُنجز تجميع الضوء بصورة رئيسية بواسطة القرنية نتيجة كون سطحها منحنياً «يحني» الضوء . ولهذا السبب لا نستطيع الرؤية بوضوح تحت الماء لانه لا يوجد فارق كاف عندئذ ما بين قرينة انكسار القرنية التي تساوي 1.37 وقرينة انكسار الماء التي تساوي 1.33 . وخلف القرنية ماء عملياً ذي قرينة الانكسار 1.33 وخلف هذا هناك عدسة ذات تركيب فريد جداً : فهي تتكون من سلسلة طبقات كطبقات بصلة عدا أنها شفافة كلها ولها قرينة انكسار مقدارها 1.40 في الوسط و 1.38 في الخارج . ( كان يكون من الجميل لو استطعنا صنع زجاج ضوئي نستطيع التحكم في قرينة انكساره الداخلية لأنه لانحتاج عندها الى إحنائه بالقدر الذي نحتاجه عندما يكون لدينا قرينة انكسار منتظمة . ) وإضافة الى ذلك فإن شكل القرنية ليس شكل كرة . فالعدسة الكروية تحوي مقداراً معيناً من الزيغ الكروي . بينما نجد أن القرنية « أكثر تسطحاً » عند الاطراف من الكرة ، بصورة تجعل الزيغ الكروي أقل مما لو وضعنا محل القرنية عدسة كروية ! ويتركز الضوء بواسطة جملة القرنية والعدسة على الشبكية . وعندما ننظر في أشياء قريبة وبعيدة فإن العدسة يزداد تحدبها أو يقل فيتغير بعدها المحرقي حتى تتلاءم مع المسافات المختلفة . وحتى تتحكم العين في كمية الضوء الداخلة فهناك الحدقة ( القزحية ) وهي ما ندعوها لون العين فقد تكون بنية أو زرقاء يعتمد ذلك على الشخص ، وحسب ما تزداد كمية الضوء أو تنقص تتحرك الحدقة فتضيق او تتسع .

ولننظر الآن في الآلية العصبية التي تتحكم في مطابقة العدسة وحركة العين وفي العضلات التي تدير العين في تجويفها وفي الحدقة وهي كلها مبينة بصورة تخطيطية في الشكل ( ٣٦ - ٣ ) . من بين كل المعلومات التي تصدر عن العصب البصري A ، ينقسم معظمها في احدى حزمتين (سنتكلم عنها فيما بعد ) تتجهان

بعدها نحو الدماغ . غير أن هناك بعض الألياف ، وهي التي تهمنا الآن ، لا تذهب مباشرة إلى لحاء الرؤية ( القشرة البصرية ) في الدماغ حيث « نرى »




الشكل (٣٦ - ٣)

الانصالات العصبية الداخلية من أجل العمل الميكانيكي للعينين

الأخيلة ، بل تذهب الى الدماغ المتوسط H . وهـــذه هي الألياف التي تقيس مقدار الضوء الوسطي وتقوم بتحكيم الحدقة ، فإذا كان في الخيال غَبَشاً فإنها تقوم بتصحيح العدسة ، أو انه إذا كان الخيال مضاعفاً فهي تحاول أن تحكّم العين من أجل الرؤية الثنائية . على كلٍ فإن هذه الالياف تخترق الدماغ المتوسط وتعود ثانية الى العين . وعند K توجد العضلات التي تقوم بمطـــابقة العدسة ، وتوجد عند L العضلات التي تذهب الى الحدقة . وللحدقة جملتان من العضلات. إحداهما عضلة دائرية L تشد عندما تتهيج فتضيق الحدقة، وهي تعمل بسرعة فائقة وتتصل الاعصاب مباشرة من الدماغ بمحاور اسطوانية قصيرة الى الحدقة . والعضلات المعاكسة عضلات قطرية بحيث أنه عندمـا تظلم الاشياء

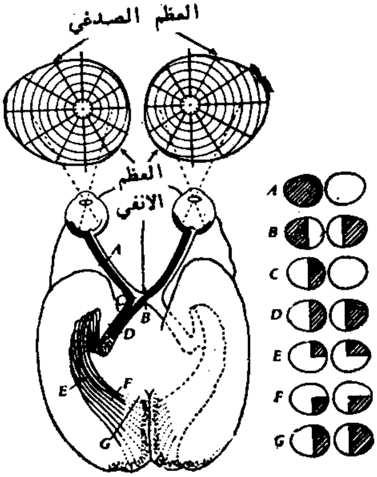
وترتخي العضلة الدائرية تشدّ هذه العضلات خارجاً . ولدينا هنا، كما هي الحال في أماكن عديدة من الجسم ، زوجان من العضلات يعملان في اتجاهين متعاكسين وفي كل حالة من هذا النوع تقريبـــاً تكون جملتي الاعصاب التي تتحكم بهما محكمتان بدقة فائقة ، بحيث أنه اذا أرسلت إشارة لتضييق إحداهـــا ترسل إشارات أخرى بصورة آلية لإرخاء الاخرى . غير ان الحدقة استثناء خاص : فإن الاعصاب التي تجعل الحدقة تتقلص هي الاعصاب التي وصفناها ، لكن الاعصاب التي تجعل الحدقة تتمدد تأتي من حيث لا يدري مكانهـا أحد بالضبط فهي تنزل اسفل النخاع الشوكي خلف الصدر الى الاقسام القصية ثم خارج النخاع الشوكي عبر العقد الرقبية وكل الطريق حولها ثم تعود الى الرأس حتى تذهب الى الناحية الاخرى من الحدقة . ففي الواقع تذهب الاشارة عبر جملة عصبية مختلفة تماماً وهي ليست الجملة العصبية المركزية بتاتاً وإنما هي الجملة العصبية الودية ، فهي لذلك طريقة غريبة جداً لجعل الاشياء تعمل .

لقد اكدنا سابقاً شيئاً آخر غريباً حول العين، هو ان الخلايا الحساسة للضوء تقع في الجانب الخاطىء ، لهذا فإن على الضوء أن يمر عبر طبقات متعددة من الخلايا الاخرى قبل ان يصل الى المستقبلات ، فقد بنيت بحيث جعل داخلها خارجها ! لهذا فإن بعض المظاهر رائعة وبعضها يبدو غبياً .

يبين الشكل ( ٣٦ – ٤ ) اتصالات العين بجزء الدماغ الذي يهتم بصورة مباشرة بعملية الرؤية . فتصل ألياف العصب البصري الى منطقـــة معينة تقع خلف D مباشرة تدعى الجسم الركبي حيث تتابع إلى قسم من الدماغ يدعى لحاء الرؤية . لاحظ أن بعض الألياف من كل عين ترسل الى الجانب الآخر من الدماغ ، لهذا فإن الصورة المتشكلة ليست كاملة . فالأعصاب البصرية من الجانب الايسر للعين اليمنى تعبر التصالب البصري D بينما تدور الاعصـاب الآتية من الجانب الايسر للعين اليسرى وتسير في الطريق نفسه . ولهذا فإن الجانب الايسر

من الدماغ يتلقى كل المعلومات التي ترد إليه من الجانب الايسر من كل كرة عين ، أي من الجانب الايمن لحقل الرؤية ، بينما يرى الجانب الايمن من الدماغ الجانب الايسر من حقل الرؤية . وبهذه الطريقة توضع المعلومات القادمة من كل عين مع بعضها لتخبرنا كم تبعد الاشياء عنا ، وهذه هي جملة الرؤية الثنائية .

إن الاتصالات مابين الشبكية والقشرة البصرية ذات أهمية . فإذا استأصلنا أو خرّبنا بقعة من الشبكية بطريقة ما فإن الليف بكامله يموت ، لذلك نستطيع إيجاد مكان الاتصال . وقد تبين أن الاتصالات واحدة لواحدة بصورة أساسية ، أي أنه من أجل كل بقعة على الشبكية توجد بقعة واحدة في القشرة البصرية ، والبقع المتقاربة جداً في الشبكية هي متقاربة جداً في القشرة البصرية أيضاً . لذلك فإن القشرة البصرية ما زالت تمثل الترتيبات المكانية للعصيات والمخاريط لكنها مشوهة جداً بالطبع . فالاشياء التي تقع في مركز حقل الرؤية والتي تشغل جزءاً صغيراً جداً من الشبكية تتوسع إلى خلايا عديدة جداً في القشرة البصرية . ومن الواضح أنه من المفيد أن تبقى الاشياء التي تكون قريبة في الاصل قريبة من بعضها ، إلا أن أبرز الصفات في هذا الموضوع مانورده أدناه : إن المكان الذي يظن المرء أنه أهم مكان يجب أن تكون فيه الاشياء قريبة من بعضها هو وسط حقل الرؤية . غير أنه من الصعب أن نصدق أن الخط الشاقولي من الاعلى إلى الاسفل في وسط حقل الرؤية لدى النظر إلى شيء ما ، هو خط يفصل بين المعلومات التي ترد من نقاط الجانب الايمن للخط والتي تذهب إلى الجانب الايسر للدماغ ، وبين المعلومات التي ترد من النقاط في الجانب الايسر الذاهبة الى الجانب الايمن من الدماغ ، وقد تكونت هذه المنطقة بحيث يوجد خط قاطع مارّ من المنتصف يجعل الأشياء القريبة جداً من بعضها عند المنتصف متباعدة جداً في الدماغ ! ويجب أن تمر المعلومات من جانب في الدماغ الى جانب آخر بطريقة ما عبر قنوات أخرى وهذا مما يثير العجب ، انظر الشكل (٣٦-٤).




الشكل ( ٣٦ – ٤ )

الاتصالات العصبية من العينين الى القشرة البصرية

والسؤال عن كيفية « وصل » هذه الشبكة الدماغية مع بعضها سؤال مهم جداً . وان مسألة كم هو الجزء الموصول بشكل وراثي ، وكم هو الجزء الذي نتعلمه مسألة قديمة . لقد ظن في القديم الغابر أنه ليس من حاجة الى التوصيل المتقن ، وانه يكفي أن يكون التوصيل في الدماغ توصيلاً تقريبياً ، ويتعلم الطفل بعدها من خبرته أنه متى كان الشيء « هناك » سينتج إحساساً معيناً في الدماغ . ( يخبرنا الأطباء دائماً بماذا « يشعر » الطفل ، ولكن كيف يعرفون هم ما هو شعور الطفل عندما يكون عمره سنة واحدة ؟ ) . فهم يفترضون أنه عندما يرى الطفل في سنته الأولى ، شيئاً « هناك » ويحصل على إحساس معين ، يتعلم كيف يمد يده هناك ، لانه عندما يمد يده « هنا » يكون الفشل نصيبه . قد لا يكون هذا السبيل صحيحاً ، لاننا وجدنا في حالات عديدة اتصالات تفصيلية خاصة . وتنورنا التجارب الكثيرة التي أجريت على السلمندر * كثيراً.

* السلمندر : حيوان برمائي من الضفدعيات يشبه الحرباء إلا ان جلده أملس وهو ملون بألوان برّاقة .
( المترجون )

نشير الى أنه ، يوجد في السلمندر اتصال مباشر دون أن يكون هناك تصالب بصري ، لأن كل عين تقع في جـــانب من جوانب الرأس ولا توجد منطقة مشتركة ، فلا يملك السلمندر رؤية ثنائية ) . والتجربة هي التالية : إننا نستطيع قطع العصب البصري في سلمندر ، فينمو هذا العصب من العين ثانية . وتستعيد نفسها ألوف مؤلفة من خلايا الالياف ، ولا تعود ألياف العصب البصري مماسة لبعضها البعض فهي تشبه كبلاً تليفونياً ضخماً رديء الصنع متشابك الخيوط ، لكن هذه الالياف تعود فتنتظم لدى دخولها الى الدماغ . والسؤال المهم الآن هل يستقيم العصب البصري أبداً بعـــد قطعه في السلمندر ؟ والجواب الجدير بالملاحظة هو نعم . فإذا قطعنا العصب البصري في سلمندر وعـاد العصب الى النمو ، تعود للسلمندر حـدة الرؤية الجيدة ثانية . غير انه إذا قطعنا العصب البصري وقلبنا العين عاليها سافلها ثم تركنا العصب ينمو ثانية ، فـتكون له حدة رؤية جيدة ولكن فيها خطأ شنيـع . ذلك انه عندما يرى السلمندر ذبابة في « الاعلى هناك » يقفز اليها نحو « الاسفل » ولا يمكن أن يتعلم ابداً . لذلك نجد ان هناك طريقة غامضة جداً حول عثور الآلاف المؤلفة من الاليـاف على أمكنتها الصحيحة في لدماغ .

إن مسألة معرفة مقدار ما هو موصول وما هو ليس كذلك مسألة مهمة في نظرية تطور المخلوقات . والجواب غير معروف لكنه يدرس الآن دراسـة مستفيضة .

ولدى إجراء التجربة نفسها على سمكة ذهبية ، يتبين ان هناك عقدة مزعجة مكان القطع في العصب البصري تشبه ندبة كبيرة، لكنه بالرغم من ذلك كله فإن الالياف تنمو ثانية لتصل الى مواقعها الصحيحة في الدماغ .

وحتى تقوم الالياف بهذا ، عليهـا ان تتخذ عدة قرارات وهي تنمو نحو القنوات القديمة في العصب البصري في شأن الاتجاه الذي تنمو وفقه ، فكيف

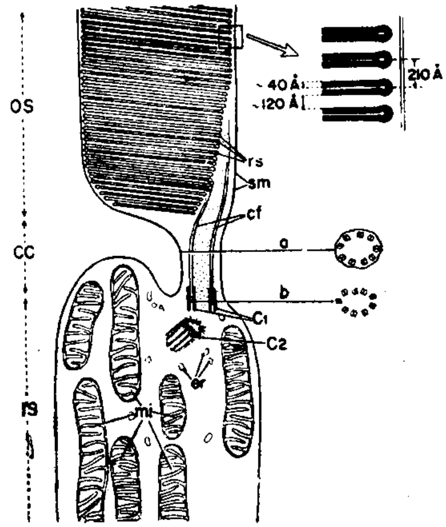
تفعل هذا ؟ يبدو ان هناك بعض الدلائل الكيميائية تستجيب لها ألياف مختلفة استجابات مختلفة . ولنتأمل في هذا العدد الهائل من الالياف النامية كل منها يختلف عن جيرانه في استجابته للدلائل الكيميائية مهما كانت بطريقة ما ، فهو يستجيب بطريقة فريدة تكفيه لايجاد مكانه للاتصال النهائي في الدماغ ! وهذا شيء مهم ورائع . وهو احد الظواهر العظيمة المكتشفة حديثاً في علم الحياة ، وهو بدون شك يرتبط بعديد من المسائل القديمة التي لم تحل في النمو والتعضي وتطور الاجهزة وخاصة في الاجنة .

وثمة ظاهرة هامة اخرى تتعلق بحركة العين : يجب ان تتحرك العينان حتى يتطابق الخيالان في أحوال مختلفة . ولهذه الحركات أنواع مختلفة ، نوع لتتبع شيء ما ويتطلب هذا حركة العينين في الاتجاه نفسه ، يمنة او يسرة ، والاخرى لتوجهها الى المكان نفسه على أبعاد مختلفة وهي تتطلب تحريك العينين في اتجاهين متعاكسين . وقد وُصلت الاعصاب الذاهبة الى عضلات العين للقيام بأعمال من هذا النوع تماماً . فهناك مجموعة من الاعصاب تجر عضلات إحدى العينين داخلاً والعين الاخرى خارجاً وترخي العضلات المعاكسة فتتحرك العينان معاً . وهناك مركز آخر يسبب فيه التهييج حركة العينين نحو بعضها من وضع التوازي . ويمكن ان تدوّر اي من العينين نحو الزاوية الوحشية إذا تحركت الاخرى نحو الانف ، لكنه من غير الممكن ان تتحرك كلتا العينين خارجاً بصورة إرادية او غير إرادية في نفس الوقت ، ولا يحدث هذا لانعدام وجود عضلات وإنما بسبب عدم إمكانية ارسال إشارة لتحريكها خارجاً ، ما لم تكن هناك إصابة او شيء ما غير طبيعي كأن يُقطع احد الاعصاب مثلاً. فعلى الرغم من ان عضلات احدى العينين يمكن ان توجهها في اي اتجاه، لا نستطيع نحن ولا حتى المتمرس في اليوغا أن يحرك كلتا العينين خارجاً بجربة تحت التحكم الطوعي ، لأنه ليس هناك اية طريقة للقيام بذلك على ما يبدو ، فالوصلات

المقامة فينا مفروضة الى حد معين . وهذه نقطة هامة لأن معظم الكتب الاولى في التشريح وعلم النفس وغيرها لاتقدّر أو لا تؤكد الحقيقة القائلة بأن الوصلات فينا كاملة الى هذا الحد فيقولون ان كل شيء نتعلمه فقط .

## ٣٦ ـ ٣ : الخلايا العصوية *The rod cells*

لنتفحص الآن بتفصيل أكثر ما يحدث في الخلايا العصوية . يبين الشكل (٣٦ ـ ٥) صورة بالمجهر الالكتروني لوسط خلية عصوية ( تحاول الخلية العصوية



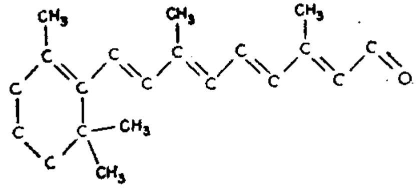

الشكل ( ٣٦ ـ ٥ )

صورة بالمجهر الالكتروني لخلية عصوية

الخروج من حقل الرؤية دائماً ) . ويوجد طبقة تلو الطبقة من التراكيب المستوية تظهر مكبرة في اليمين . وهي تحوي مادة الرودوبسين ( ارجوان الرؤية ) . وهذه المادة عبارة عن ملون او صبغة ينتج تأثيرات الرؤية في العصيات .

والرودوبسين ( الذي هو الصبغة ) هو بروتين ضخم يحتوي مجموعة خاصة تدعى الريتينين والتي يمكن فصلها عن البروتين ، وهي بدون شك السبب الرئيسي في امتصاص الضوء . إننا لا نفهم سبب وجود المستويات . غير أنه من المرجّح وجود سبب معين لإبقاء جزيئات الرودوبسين متوازية . وقد دُرست كيمياء هذا الموضوع الى حد بعيد ، ولكن قد تلعب الفيزياء فيها دوراً أيضاً . فقد يكون ترتيب الجزيئات على نسق بحيث أنه إذا تهيجت إحداهـا استطاع الالكترون المتولد مثلاً أن ينتقل الطريق كله الى اسفل المكان عند النهاية ليخرج الاشارة. وهذا موضوع هام جداً لم يُدرس بعد . وانه حقل ستُستخدم في دراسته في نهاية الامر الكيمياء الحيوية وفيزياء الجسم الصلب أو شيء شبيه بها .

يظهر هذا النوع من التركيب الطبقي في أحوال أخرى حيث يكون الضوء ذا اهمية ، كما في حبيباب اليخضور في النباتات حيث يسبب الضوء حادثة التركيب الضوئي . فإذا كبرنا هذه الحبيبات وجدنا الشيء نفسه تقريباً ونفس النوع من الطبقات ، لكننا نجد هنا اليخضور محل الريتينين . تظهر الصيغة الكيميائية للريتينين في الشكل ( ٣٦ — ٦ ) . إنها تحوي سلسلة من




الشكل ( ٣٦ — ٦ )
تركيب الريتينين
The structure of retinene

الروابط المضاعفة المتناوبة على طول فرع جانبي وهذا ما يميز كل المواد العضوية الشديدة الامتصاص كاليخضور والدم وغيرها . ولا يستطيع الانسان أن يضع

هذه المادة في خلاياه بل علينا أكلها . لذلك فإننا نأكلها على شكل مادة خاصة تتطابق تمـــاماً مع الريتينين عدا وجود هدروجين مرتبط عند النهاية اليمنى . قد تدعى هذه المادة الخاصة الفيتامين A، وإذا لم نأكل من هذه المادة ما يكفي ، لم نحصل على زاد يكفي من الريتينين وتصاب العين بما يسمى العَشَا* ، لأنه لا يوجد عندئذ صبغة كافية من الرودوبسين حتى نرى ليلاً باستخدام العصيات .

وإن سبب كون سلسلة الروابط المضاعفة شديـــدة الامتصاص للضوء معروف أيضاً وسنشير الى ذلك اشارة عابرة فقط : تدعى سلسلة الروابط المضاعفة المتناوبة الرابطة المضاعفة المرافقة ، وتعني الرابطة المضاعفـة وجود الكترون إضافي هناك ، ويمكن ازاحة هذا الالكترون الاضافي بسهولة نحو اليمين أو اليسار . وعندما يسقط الضوء على هذه الجزيئة ينزاح الكترون كل رابطة مضاعفة بمقدار درجـة واحدة . فتنزاح كل الالكترونات في السلسلة بصورة مشابهة لصف من الالعاب يسقط ، ورغم أن كلاً منها يتحرك مسافة صغيرة فقط ( نتوقع أن يتحرك الالكترون في ذرة منفردة مسافة صغيرة فقط ) ، فإن الاثر الناتج يكون كما لو أن الالكترون عند إحدى النهايتين تحرك الى النهـاية الاخرى ! فهي كما لو ان الالكترون يذهب ويعود على طول المسافة كلها ، ولذلك سنحصل بهذا الشكل على امتصاص اقوى بكثير ، تحت تأثير الحقل الكهربائي ، مما كنا نستطيع الحصول عليه لو اننا كنا لا نستطيع تحريك الالكترون إلا لمسافة مقابلة لذرة واحدة . لهذا فطالما انه من السهل تحريك الالكترونات الى الامام والخلف يمتص الريتينين الضوء بشدة ، وهذه هي آلية النهاية الفيزيائية الكيميائية للحادثة المدروسة .

### ٣٦ — ٤ : العين المركبة ( في الحشرات ) The compound (isect) eye

لنعد الآن الى علم الحيـاة ( البيولوجيا ) . فعين الانسان ليست النوع الوحيد . وتكاد العيون في الفقاريات تشبه عين الانسان . غير ان هناك انواعاً

* العشا : مصدر الأعشى وهو الذي لا يبصر بالليل ويبصر بالنهار . ( المترجمون )

اخرى عديدة من العيون في الحيوانات الدنيا : مثل البقع البصرية ، والفناجين البصرية المختلفة وغيرها من الاشياء الاقل حساسية التي لا نملك متسعاً من الوقت لمناقشتها . لكنه يوجد عين متطورة الى حد كبير بين اللافقاريات تلك هي العين المركبة في الحشرات . ( تملك معظم الحشرات ذات العيون المركبة الضخمة عيوناً إضافية بسيطة مختلفة ايضاً ) . والنحلة حشرة درست الرؤية عندها بعناية فائقة . ومن السهل دراسة خواص الرؤية في النحل لانها تنجذب الى العسل ، فنستطيع اجراء تجارب نتعرف بها على العسل بوضعه على ورق ازرق او ورق احمر ونراقب الى اي منهما يأتي النحل . وبهذه الطريقة استطعنا اكتشاف اشياء كثيرة مهمة حول الرؤية في النحل .

لقد حاول بعض الباحثين ، بادىء ذي بدء ، قياس حدة البصر عند النحل في تمييز فارق اللون ما بين قطعتين من الورق « الابيض » ، فوجد بعضهم ان النحل لم يكن قديراً جداً ، في حين وجد البعض الآخر ان النحل ذو قدرة فائقة . فالنحل يستطيع تمييز الفارق حتى اذا كانت قطعتا الورق الابيض متماثلتين تماماً تقريباً . وقد استعمل المجربون ابيض التوتياء في احدى القطعتين وابيض الرصاص في قطعة الورق الاخرى ، فاستطاع النحل التفريق بينهما بسهولة على الرغم من انهما تظهران لنا باللون نفسه تماماً . وقد استطاع النحل تمييزهما لانهما تعكسان مقدارين مختلفين في مجال فوق البنفسجي . وبهذه الطريقة اكتشف ان عين النحل حساسة في مجال من الطيف اوسع من مجال اعيننا . فعيننا تعمل ما بين 7000 انغستروم و 4000 انغستروم ، من الاحمر وحتى البنفسجي ، غير ان النحل يستطيع الرؤية حتى 3000 انغستروم في مجال فوق البنفسجي ! وهذا يفسر عدداً من الآثار المهمة المختلفة : فأولاً ، يستطيع النحل التمييز ما بين ازهار عديدة تبدو لنا متشابهة . وعلينا ان ندرك ان الوان الازهار لم تصمم من اجل اعيننا ، بل من اجل النحل ، فهي اشارات

تجذب النحل الى زهرة معينة . فنعلم جميعنا ان هناك عديداً من الازهار « البيضاء » . ويبدو أن الابيض لا يهتم به النحل كثيراً ، لانه تبين ان لكل الازهار البيضاء نسب انعكاس مختلفة في مجال فوق البنفسجي ، وهي لا تعكس من الضوء فوق البنفسجي واحداً بالمئة مما يعكسه اللون الابيض الحقيقي . فلا يرتد الضوء ثانية ، بل ينقصه فوق البنفسجي ، فيكون لهـذه الزهرة « البيضاء » لون في عين النحل ، تماماً كما لو أن الضوء المنعكس عن جسم كان ينقصه الازرق فنراه نحن بلون اصفر . لذلك فإن كل الازهار ملونة بالنسبة للنحل ، غير أننا نعلم أيضاً ان النحل لا يرى الاحمر . وقـد نتوقع أن تبدو الازهار الحمراء كلها سوداء بالنسبة للنحل . لكن الامر غير ذلك ! لان الدراسة الدقيقة للزهور الحمراء تبين أولاً : أنه حتى بالنسبة الى اعيننا نحن فإننا نرى الغالبية العظمى من الزهور الحمراء ضاربة الى الزرقة ، لانها تعكس بصورة رئيسية كمية اضافية من الازرق وهو الجزء الذي تراه النحلة . وقـد بينت التجارب إضافة الى ذلك أن الازهار تختلف في عكسها لفوق البنفسجي باختلاف الاجزاء من البتلة او التويجية وهكذا. لهذا لو استطعنا رؤية الازهار كما يراها النحل لوجدناها أجمل بكثير مما نراها الآن وأكثر تنوعاً !

وقد تبين إضافة الى ذلك أن هناك بعض الازهار الحمراء لا تعكس أضواء في مجال الازرق او فوق البنفسجي ، وستظهر للنحل بسبب ذلك سوداء ! وكان لهذا الامر اهمية بين الاشخاص المعنيين بذلك ، فالاسود لا يعود لوناً مهماً لأنه يصعب تمييزه عن ظل اسود سحيق . وقد اكتشف ان هذه الازهار لا يزورها النحل ، وإنما يزورها الطير الطنان ، لأن الطير الطنان يستطيع رؤية الاحمر !

ومن المظاهر الهامة الاخرى في الرؤية عند النحل أنها تستطيع على ما يبدو ، تحديد جهة الشمس بالنظر الى قطعة من السماء الزرقاء دون ان ترى الشمس نفسها . ونحن لا نستطيع القيام بذلك بسهولة . إذ لو نظرنا من النافذة الى

السماء ورأيناهـــا زرقاء ، فكيف نحدد جهة الشمس ؟ ويستطيع النحل القيام بذلك لأنه حساس لاستقطاب الضوء ولأن الضوء المنتثر في السماء ضوء مستقطب*. وما زال النقاش يدور حول كيفية عمل هذه الحساسية ، ولم يُعرف بعد ما إذا كان سببها اختلاف انعكاس الضوء في أحوال مختلفة ، أو ان سببهـا الحساسية المباشرة لعين النحل† .

وقد قيل كذلك ، أن النحل يستطيع ملاحظة وميضاً متقطعاً حتى 200 اهتزازة في الثانية ، بينما نحن لا نستطيع ان نرى التقطع إلا اذا كان تواتره أقل من 20 اهتزازة . إن حركات النحل في خلاياه سريعة جـداً ، فالارجل تتحرك والاجنحة ترتجف ، غير أنه من الصعب علينا جداً ملاحظة ذلك بأعيننا. لكنه لو استطعنا الرؤية بسرعة أكبر لاستطعنا رؤية هذه الحركة . ومن المحتمل أن تكون استجابة عين النحل السريعة هذه ذات أهمية بالغة بالنسبة له .

ولنناقش الآن حدة الرؤية التي نتوقعها في النحل. إن عين النحلة عين مركبة، وهي تتكون من عدد كبير من الخلايا الخـاصة المسماة الاوماتيديا ، وتترتب هذه الخلايا مخروطياً على سطح كرة ( تقريباً ) خارج رأس النحلة . ويبين الشكل

---

* تملك عين الانسان أيضاً حساسية ضعيفة لاستقطاب الضوء ، ويستطيع المرء ان يتعلم كيف يحدد اتجاه الشمس ! وتدعى الظاهرة المعنية هنا فرشاة هيدنجر ، ونرى فيها غطاً مائلاً الى الاصفرار ، يشبه الساعة الرملية ، في مركز حقل الرؤية وذلك عندما نستخدم نظـــارات مقطبة وننظر الى رقعة فسيحة من البر او البحر . ويستطيع المرء ان يرى الظاهرة نفسها ايضاً عندما ينظر الى السماء الزرقاء بدون نظارات مقطبة إذا أدار رأسه الى الامـام والخلف حول محور الرؤية .

† لقد حصل العلماء ، بعد القـــاء هذه المحاضرة ، على الدليل الذي يشير الى أن العين ذات حساسية مباشرة .

( ٣٦ — ٧ ) صورة لإحدى الاوماتيديا* . وتوجد عند القمة منطقة شفافة ، هي « عدسة » من نوع ما ، لكنها في الواقع تشبه مرشحاً او انبوباً ضوئياً يجعل الضوء يسير على طول الليف الضيق ، وفي هذا الليف يحدث امتصاص الضوء على ما يظهر . ويخرج من النهاية الاخرى للخلية الليف العصبي . كما يحـــاط الليف المركزي من جوانبه بخلايا ست هي في الواقع التي افرزت هذا الليف . وفي هذا




الشكل ( ٣٦ — ٧ )
تركيب واحد من الاوماتيديا ( خلية وحيدة من عين مركبة )
*ommatidium*

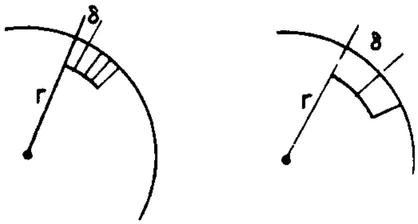
---

* الاوماتيديا ( Ommatidia ) هي جمع اومـــاتيديوم ( Ommatidium ) ، وقد عرّبها البعض بالعربية ، واستخدمنا هنا اللفظ الاجنبي لشيوعه في دراسات علم الحياة.

( المترجمون )

الوصف مايكفي حاجتنا ، فالمهم ان الاوماتيديوم شيء مخروطي ويمكن ان يوجد كثير منها جنباً الى جنب فوق سطح عين النحلة .

ولنناقش الآن مقدرة الفصل في عين النحلة. إذا رسمنا خطوطاً تمثل الاوماتيديا على السطح الذي نفترضه كرة نصف قطرها r ، انظر الشكل ( ٣٦ – ٨ ) ،




الشكل ( ٣٦ – ٨ )
منظر تخطيطي يمثل تنضد الاوماتيديا في عين النحلة
packing

فنستطيع في الواقع حساب عرض كل اوماتيديوم وذلك باستخدام أدمغتنا ، وعلى افتراض ان التطور ذا ذكاء يساوي ذكاءنا ! فإذا كان لدينا اوماتيديوم كبير جداً فان مقدرة الفصل لا تكون كبيرة ، بمعنى ان إحدى الخلايا تحصل على جزء من المعلومات باتجاه معين والخلية المجاورة تحصل على جزء آخر وباتجاه آخر ، وهكذا ، فلا تستطيع النحلة بذلك تمييز الاشياء الواقعة ما بينها بصورة حسنة . لذلك فإن الشك في حدة الرؤية في العين سيقابل حتماً زاوية ، هي زاوية عرض الاوماتيديوم بالنسبة لمركز انحناء العين . ( وبالطبع فإن خلايا العين توجد على سطح الكرة فقط ، اما في الداخل فهناك رأس النحلة ) . وهذه الزاوية ، هي من اوماتيديوم الى الذي يليه ، وهي تساوي طبعاً قطر الاوماتيديوم مقسوماً على نصف قطر سطح العين :

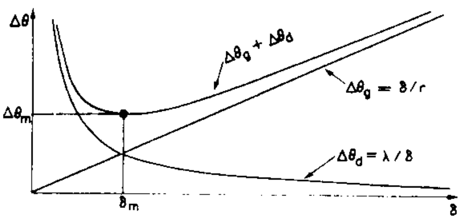
$$\Delta\theta_g = \delta/r \qquad (36-1)$$

لذا نقول انه « كلما استطعنا جعل $\delta$ ادق ، كلما ازدادت حـــدة الرؤية . فلماذا لا يستخدم النحل أوماتيديا دقيقة جداً جداً ؟ » والجواب : إننـا نعرف من الفيزياء ما يرشدنا الى أنه إذا حاولنا الحصول على ضوء من شق ضيق ، فإننا لا نستطيع الرؤية بدقة في اتجاه معين بسبب أثر الانعراج . فيمكن للضوء أن يدخل من اتجـاهات مختلفة وبسبب الانعراج سنحصل على ضوء يرد ضمن زاوية $\Delta\theta_d$ تعطى بالعلاقة :

$$\Delta\theta_d = \lambda / \delta \qquad (36-2)$$

ونرى الآن أنه لو جعلنا $\delta$ صغيرة جداً ، لن ترى كل اومـــاتيديوم اتجاهاً واحداً فقط بسبب الانعراج ! وإذا جعلنا $\delta$ كبيراً جـداً تستطيع كل منها الرؤية في اتجاه معين ، لكنه لن يكون هناك عدد كاف منها للحصول على منظر جيد للمشهد . لذلك نحكم المسافة $\delta$ بحيث تجعل الاثر الكلي لكليهما معـاً في نهاية صغرى . فاذا جمعناهما معـاً لايجاد المكان الذي يكون عنده المجموع أصغرياً ، انظر ( الشكل ٣٦ — ٩ ) ، فاننا نجد :

$$\frac{d(\Delta\theta_g + \Delta\theta_d)}{d\delta} = 0 = \frac{1}{r} - \frac{\lambda}{\delta^2} \qquad (36-3)$$




الشكل ( ٣٦ — ٩ )

إن الحجم المناسب للأوماتيديوم هو $\delta_m$

التي تعطى المسافة :

$$\delta = \sqrt{\lambda r} \qquad (36-4)$$

فإذا خمّنا أن r حوالي 3 ملمترات ، وقبلنا أن طول موجة الضوء الذي تراه النحلة هو 4000 انغستروم ، ووضعناهما معاً ثم أخذنا الجذر التربيعي نجد :

$$\delta = (3 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-7})^{1/2}\ \mathrm{m}$$

$$\delta = 3.5 \times 10^{-5}\ \mathrm{m} = 35\ \mu \qquad (36-5)$$

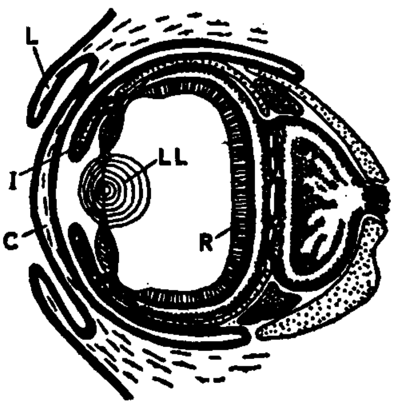
وتقول الكتب أن قطر الاوماتيديوم $30\mu$ ، وهذا توافق جيد ! لذلك ، على ما يبدو ، فإن هذه تعطينا النتيجة ونستطيع بالتالي فهم الشروط التي تحدد حجم عين النحلة ! وكذلك فمن السهل ان نضع هذا الرقم لنجد مدى جودة عين النحل في مقدرة الفصل الزاوي ، فنجد أنها هزيلة جداً بالنسبة لما نملك . إننا نستطيع رؤية أشياء اصغر بثلاثين مرة في حجمها الظاهري مما يراها النحل ، فالنحل يرى خيالاً مشوشاً غير واضح بالمقارنة مع ما نستطيع رؤيته نحن . لكن الرؤية على الرغم من ذلك كافية وهي أفضل ما يستطيع النحل فعله . وقد نتساءل لماذا لا يطوّر النحل عيناً جيدة كعيننا ، ذات عدسة وما الى ذلك . هناك عدة اسباب هامة . أولاً إن النحل صغير جداً ، فلو كانت له عين كعيننا ولكن بقياسه ، لوجب ان تكون فتحتها حوالي $30\mu$ ولبلغ الانعراج عندئذ شأناً عظيماً يمنعها من أن ترى رؤية حسنة على أي حال. فليست العين بجيدة عندما تكون مفرطة في الصغر . ثانياً ، لو أن العين كانت كبيرة كبر رأس النحل ، لشغلت العين رأس النحلة كاملاً . وجمال العين المركبة هو أنها لا تشغل حيزاً كبيراً ، فهي طبقة رقيقة على سطح النحلة . لذلك عندما نجادل ونقول بأنه كان عليهم ان يقوموا بذلك وفق طريقتنا ، علينا ان نتذكر ان عندهم مشاكلهم الخاصة !

## ٣٦ ـ ٥ : العيون الاخرى Other eyes

هناك حيوانات متعددة أخرى ترى اللون غير النحل . فالسمك والفراش والطيور والزواحف تستطيع رؤية اللون ، غير أنه من المعتقد أن معظم الثدييات لا تستطيع ذلك. أما القرود العليا فتستطيع أن ترى الالوان. وتستطيع الطيور بالتأكيد رؤية اللون وهذا يفسر ألوان الطيور . فليس هناك من معنى لألوان ذكور الطير الزاهية إن لم تستطع الاناث رؤيتها ! اي ان تطور « الشيء » الجنسي الذي تملكه الطيور هو نتيجة لمقدرة الانثى على رؤية اللون . لذلك عندما نرى ذكر الطاووس ثانية ونفكر في بهاء عرض الالوان الزاهية التي يملكها وفي رهفتها وبكم نحتاج من الحسّ الفني الرقيق حتى نقدر كل ذلك ، علينا أن لا نهنىء ذكر الطاووس على ذلك بل أن نهنىء حدة البصر والحس الفني في أنثاه ، لأن هذين العاملين هما مولدا المنظر الجميل !

طورت كل اللافقاريات عيوناً ، او عيوناً مركبة ، سيئة ، لكن كل الفقاريات لها عيون مشابهة لأعيننا باستثناءٍ واحد . وعندما نسأل عادة عن الشكل الأعلى للحيوان نجيب « هذا نحن ! » ، لكنه إذا أخذنا وجهة نظر أقل تحيزاً وقيدنا أنفسنا باللافقاريات ، بحيث لا نقحم أنفسنا ، ثم سألنا عن الحيوان اللافقاري الاعلى ، فمعظم علماء الحيوان يوافقون على أن الاخطبوط هو الحيوان الأعلى ! ومما يثير الاهتمام انه بالاضافة الى تطور دماغه وانعكاساته وغيرها التي تعتبر جيدة بالنسبة للافقاري ، فقد طور أيضاً وبصورة مستقلة عيناً مختلفة . هذه العين ليست عيناً مركبة او بقعة بصرية ، بل لها قرنية وجفنان وحدقة وعدسة ولها منطقتان مائيتان وشبكية في الخلف ، فهي من حيث الاساس مثل عين الفقاريات ! وهو مثال بارز لتطابق في التطور تكتشف الطبيعة الحل نفسه للمسألة مرتين ، مع تحسين واحد بسيط . فقد تبين ايضاً ، وهذا مما يدعو

الذهول ، أن الشبكية هي جزء من الدماغ برز بنفس الطريقة في التطور الجنيني كتلك الطريقة في الفقاريات ، لكن الشيء المهم المختلف هو ان الخلايا الحساسة للضوء واقعة في الداخل والخلايا التي تقوم بالحساب خلفها، عوضاً عن أن تكون « بالعكس » كما هي الحال في عين الانسان . وهكذا نرى عدم وجود سبب جيد لهذا الحل الذي يجعل - داخل العين خارجها - والذي تبنته الطبيعة في حالتنا . وعندما تصدت الطبيعة الى حل المسألة نفسها ثانية حصلت على حل صحيح ! انظر الشكل ( ٣٦ - ١٠ ) . إن اكبر العيون في العالم هي عيون الحبّار العملاق * ، فقد وجد أن قطرها يصل الى خمسة عشر إنشاً !
gaint squid




الشكل (٣٦ - ١٠)

عين الاخطبوط
the eyes of octopus

## ٣٦ - ٦ : عصبية الرؤية Neurology of Vision

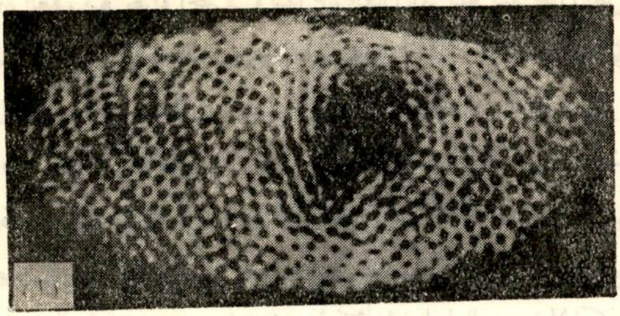
إن إحدى النقاط الرئيسية في موضوعنا هي الربط الداخلي للمعلومات المحصلة

* نوع من أنواع الرخويات له عشرة اذرع . ( المترجمون )

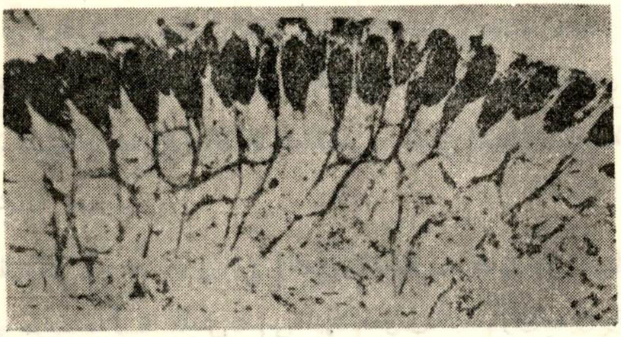
في جزء من العين مع جزء آخر . ولندرس العين المركبة لسرطان نعل الحصان، فقد أجريت تجارب كثيرة عليه. وعلينا ان نقدر أولاً نوع المعلومات التي يمكن أن تنتقل عبر الاعصاب . يحمل العصب نوعاً من الاضطراب له أثر كهربائي يسهل كشفه ، فهو نوع من الاضطراب شبيه بالموجة ينتشر في العصب فينشأ عنه أثر عند الطرف الآخر ، وتحمل المعلومات قطعة طويلة من خلية العصب ، تدعى المحور الاسطواني، وينتشر نوع معين من النبضة تدعى « شوكة كهربائية » عندما يهيج في إحدى النهايتين. وعندما تنتشر شوكة على طول العصب لا يمكن أن تتبعها شوكة أخرى مباشرة . ويكون لكل الشوكات حجم واحد ، فلا نحصل على شوكات أعلى عندما يهيج الشيء بشدة اكثر بل نحصل على عدد أكثر من الشوكات في الثانية . ويتحدد حجم الشوكة بالليف العصبي . ومن المهم ان نفهم هذا حتى نتابع ما يحصل بعدئذ .

يبين الشكل [٣٦ – ١١ (أ) ] العين المركبة لسرطان نعل الحصان ، وهي ليست عين جيدة جداً ، فليس فيها إلا حوالي ألف أوماتيديا، وفي الشكل [ ٣٦ – ١١ ( ب ) ] مقطع عرضي للجملة ، ويمكن للمرء أن يرى الأوماتيديا والالياف العصبية الصادرة عنها والذاهبة الى الدماغ . لكن لنلاحظ ان هناك بعض الوصلات الداخلية حتى في سرطان نعل الحصان . وهي أقل تعقيداً مما هي عليه في عين الانسان ، وهي تعطينا فرصة لدراسة مثال أبسط .

ولنلق نظرة على التجارب التي أجريت بوضع مساري دقيقة في العصب البصري لسرطان نعل الحصان ، وبتسليط ضوء على إحدى الأوماتيديا فقط ، ويسهل إجراء ذلك باستخدام العدسات. فإذا أضأنا في لحظة ما $t_0$ ، وقسنا النبضات الكهربائية الصادرة ، وجدنا تأخراً طفيفاً ثم سلسلة من الانفراغات السريعة التي تتباطأ تدريجياً حتى تصل الى معدل منتظم كما هو مبين في الشكل [ ٣٦ – ١٢ (أ)] . وعندما ينطفىء الضوء تقف الانفراغات . ومن الغريب



( أ )



( ب )

( الشكل ٣٦ - ١١ )

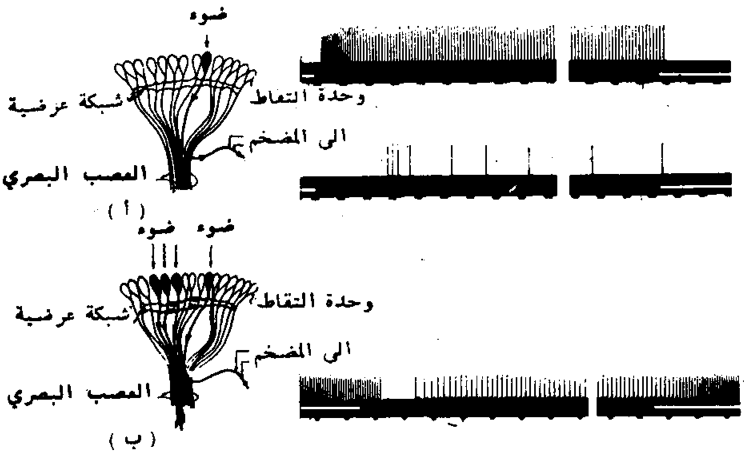
العين المركبة لسرطان نعل الحصان horeshoe carb

( أ ) منظر عمودي ( ب ) مقطع عرضي
Cross view Normal view

جداً ان لا يحصل شيء في هذا الليف العصبي الموصول الى المضخم عندما نسلط ضوءاً على أوماتيديوم أخرى ، فلا نحصل على إشارة .

ولنقم الآن بتجربة أخرى : فنسلط ضوءاً على الاوماتيديوم الاولى لنحصل على الاستجابة نفسها ، لكنه إذا سلطنا ضوءاً على واحدة أخرى قريبة ، بالاضافة الى الضوء الاصلي ، وجدنا انقطاعاً وجيزاً في النبضات ثم تعود فتنبض بمعدل أبطأ بكثير كما في الشكل [ ٣٦ - ١٢ ( ب ) ] . فينقص معدل نبضات إحداها بسبب النبضات الصادرة عن الاخرى ! وبكلام آخر : فإن كل ليف عصبي

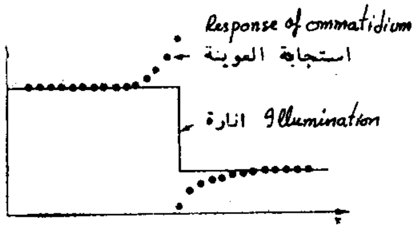
يحمل معلومات من احدى الاوماتيديا لكن الكمية التي يحملها ُتعاق بفعل




الشكل ( ٣٦ – ١٢ )
إستجابة الالياف العصبية في عين سرطان نعل الحصان للضوء

الإشارات الصادرة عن الاوماتيديوم الاخرى . فعلى سبيل المثال إذا أضيئت العين كاملة إضاءة منتظمة تقريبــــاً ، كانت المعلومات الصادرة عن أي من الاوماتيديا ضعيفة نسبياً ، لأنها تكون معاقة بعدد كبير من الاوماتيديا . وفي الواقع فان هذه الاعاقة ُتجمع ، أي أننـا اذا سلطنا ضوءاً على عدة اوماتيديا متجاورة كانت الاعاقة كبيرة جداً ، وتكون الاعاقة أعظم عندما تكون الاوماتيديا أقرب ، واذا كانت الاوماتيديا بعيدة بعضاً عن بعض ، بعداً كافياً كانت الاعاقة صفراً عملياً . لذلك فالاعاقة قابلة للجمع وتتعلق بالمسافة ، وفي هذا أول مثال عن تركيب المعلومات الصادرة عن اجزاء مختلفة من العين في العين نفسها . وربما نستطيع أن ندرك ، إذا فكرنا في ذلك برهة ، ان هـذه الآلية تزيد من التباين (enhance contrast) عند أطراف الاشياء، لأنه إذا كان جزء من المشهد مضيئاً وجزء آخر اسود ، فستعطي الاوماتيديا الموجودة في المنطقة المضيئة نبضـات

يعوقها كل الضوء الآخر في الجوار ، فتكون بذلك ضعيفة نسبياً . ومن ناحية أخرى إذا كان أوماتيديوم واقعاً عند حدود الانارة وأعطي نبضة « بيضاء » فإن هذه النبضة تكون معاقة ايضاً من النبضات الاخرى المجاورة ، إلا ان عدد هذه النبضات ليس كبيراً كما كان لأن بعضها اسود ، وتكون الاشارة الناتجة لذلك أقوى. وستكون النتيجة منحنياً يشبه المنحني المبين في الشكل (٣٦ ١٣) ، وسيرى السرطان زيادة في حدة المحيط .




الشكل ( ٣٦ – ١٣ )
The net response
الاستجابة الحاصلة في اوماتيديا سرطان نعل الحصان
قرب تغير حاد في الاضاءة
sharp change

إن حقيقة ازدياد حدة المحيط حقيقة معروفة منذ أمد طويل ، فقد علق على هذا الشيء الملحوظ علماء النفس مرات عديدة . فنحن حتى نرسم جسماً يكفينا ان نرسم الخطوط الخارجية التي تؤلف محيطه فقط . وكم نحن آلفون لرؤية الصور التي لا تحوي إلا خطوطاً خارجية فقط ! وما هي الخطوط الخارجية ؟ ليست الخطوط الخارجية إلا الحد الفاصل بين الضوء والظلام او بين لون وآخر ، فهو ليس شيئاً محدداً . فليس لكل جسم خطاً حوله ، كما نتصور دوماً ! ولا يوجد خط من هذا النوع ، فهذا الخط موجود في تركيبنا النفسي فقط ، وإننا بدأنا في فهم الاسباب التي تجعل « الخط » كافياً ليرشدنا الى الشيء كله . فعيننا تعمل ، على ما يبدو ، بصورة مماثلة بعض الشيء لعين السرطان ، وإن كان عملها اكثر تعقيداً بكثير .

اخيراً ، سنصف باختصار البحث الاكثر تفصيلاً ذلك هو العمل المتقدم الجميل الذي انجز على الضفدع . فبالقيام بتجربة مقـــابلة على الضفدع ، وذلك بوضع مجسات كالابر ، جميلة ودقيقة جداً في العصب البصري لضفدع ، نحصل على الاشارات الذاهبة عبر محور اسطواني معين فنجد ، كما في حالة السرطان تماماً ، أن المعلومات لا تتعلق ببقعة واحدة في العين ، وإنما هي مجموع معلومات تصدر عن بقع متعددة .

وإن أحدث صورة لكيفية عمل عين الضفدع هي التالية : يوجد أربعة انواع من الالياف العصبية البصرية ، بمعنى ان هنـــاك أربعة انواع من الاستجابات المختلفة. ولم تُجرَ هذه التجارب بتسليط الضوء وقطعه على شكل نبضات ضوئية، فليس هـذا ما يراه الضفدع . إذ ان الضفدع يجلس في مكانه ولا تتحرك عيناه أبداً ما لم تتخبط ورقة زنبق الماء الى الامام والخلف ، وفي هذه الحـالة ترتجف عيناه بحيث يبقى الخيال ساكناً . والضفدع لا يدير عينيه ، وإذا تحرك اي شيء ضمن حقل رؤيته ، مثل حشرة صغيرة ( إذ أن على الضفدع ان يكون قادراً على رؤية شيء صغير تتحرك أمام ارضية ثابتة ) انفرغت اربعـة انواع مختلفة من الالياف لُخصت خواصها في الجـدول ( ٣٦ – ١ ) . فاكتشاف الحدّ الدائم

**الجدول ( ٣٦ - ١ )**

**أنواع الاستجابة في الألياف الضوئية العصبية في ضفدع**

| النوع | السرعة<br>speed | الحقل الزاوي<br>Angular field |
|---|---|---|
| ١ – كشف الحد الدائم الذي لايقبل المحي<br>Sustained edge detection (nonerasable) | 0.2 – 0.5 m/sec | 1° |
| ٢ – كشف لحد المحدب (قابل المحي)<br>Convex edge detection (erasable) | 0.5 m/sec | 2° - 3° |
| ٣ – كشف التغيرات في التباين<br>Changing contrast | 1 – 2 m/sec | 7° – 10° |
| ٤ – كشف التعتيم Dimming detection | حتى 0.5 m/sec | حتى 15° |
| ٥ - كشف الظلمة Darkness detection | ? | كبير جداً |

الذي لايقبل المحي يعني انه لو وضعنا جسماً ذا حـــدّ في حقل رؤية الضفدع فسيكون هناك نبضات متعددة في هذا الليف بالذات عندمـا يتحرك الجسم ، لكنها تتخامد الى نبضة دائمة تستمر طالمـا ان الحد هناك ، حتى ولو كان الحدّ ساكناً، وإذا أطفأنا الضوء توقفت النبضات. وإذا اشعلنا الضوء ثانية والحد هناك تبدأ النبضات من جديد ، فهي ليست قابلة للمحي. وهناك نوع آخر من الالياف مماثل تماماً ، عدا أنه لا يعمل إذا كان الحدّ مستقيماً . فيجب ان يكون حـدّاً محدباً وخلفه ظلام ! فكم هي معقدة جمـلة الوصلات الداخلية في شبكية عين الضفدع حتى تستطيـع فهم وجود سطح محدب يتحرك ! أضف الى ذلك ، انه على الرغم من ان هـــذا الليف له بعض الديمومة لكنه لا يدوم لفترة في الليف الآخر ، وإذا أطفأنا الضوء ، ثم عدنا وأضأناه ، فإن النبضة لا تعود الى الظهور ثانية . فهذا الليف يتعلق بالسطح المحدب المتحرك . فالعين تراه يدخل وتتذكر انه هناك ، لكنه إذا اطفأنا الضوء نسيته ولا تعود ترى الجسم .

وثمة مثال آخر هو كشف التغيّير في التباين . فإذا كان هناك حدّ يتحرك نحو الداخل او الخارج كانت هناك نبضات ، لكنه اذا توقف الشيء ساكناً لم تبق نبضات ابداً .

وهنـاك بعدئذ كاشف التعتيم . فإذا كانت شدة الضوء تتناقص أحدثت نبضات ، أما إذا بقيت الشدة كما هي ، عالية او منخفضة ، فان النبضات تتوقف فهذا الكاشف يعمل فقط عند تعتيم الضوء .

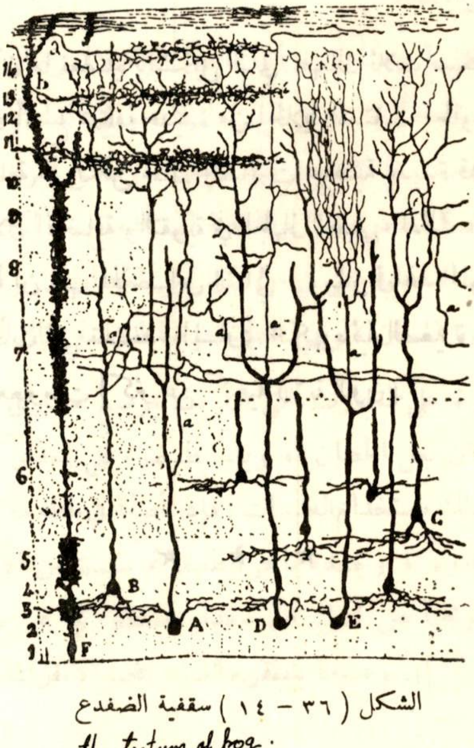
وهناك اخيراً بضعة ألياف كاشفة للظلمة ، وهي شيء عجيب حقـاً ، فهي تقدح طوال الوقت ! وإذا زدنا من شدة الضوء قدحت بسرعة أبطـأ ولكن تبقى تقدح طوال الوقت. وإذا انقصنا الضوء قدحت بسرعة اكبر طوال الوقت.

وتقدح في الظلمة بجنون وكأنها تقول « إنه ظلام ! إنه ظلام ! إنه ظلام ! » .

تبدو هذه الاستجابات صعبة التصنيف ومعقدة ، ولربما نشك في أن التجارب قد فسرّت خطأ . لكن المهم حقاً هو أن هذه الاصناف نفسها قد فصلت بوضوح في تشريح الضفدع ! فبعد تصنيف هذه الاستجابات أجريت قياسات أخرى (والمهم في هذا الموضوع أن هذه القياسات اجريت بعد التصنيف) اكتشف فيها ان سرعة الإشارات في الالياف المختلفة ليست واحدة ، وبذلك نرى ان هناك طريقة مستقلة اخرى للتحقق من نوع الليف الذي وجدناه !

وهناك سؤال مهم آخر هو كم تكون المساحة التي يقوم ليف عصبي معين بإجراء حساباته فيها ؟ والجواب هي أنها تختلف باختلاف الصنف .

يبين الشكل ( ٣٦ - ١٤ ) سطح ما يدعى سقفية الضفدع ، حيث تصل




الشكل ( ٣٦ - ١٤ ) سقفية الضفدع

the tectum of frog.

الاعصاب الى الدماغ من العصب البصري . فكل الالياف العصبية الواصلة من العصب البصري تصنع اتصالات مع طبقات مختلفة من السقفية . ويشبه هـــذا التركيب الطبقي تركيب الشبكية . وهذا ما يجعلنا جزئياً ، نقول ان الشبكية والدماغ متشابهان جداً ، فاذا أخذنا مسرى كهربائياً وحركناه أسفل الطبقات على التتالي ، استطعنا ايجاد أي نوع من الاعصاب البصرية تنتهي عنده ، والنتيجة العجيبة والجميلة هي ان انواعـــاً مختلفة من الالياف تنتهي في طبقات مختلفة ! فالاعصاب الاولى تنتهي عند النوع رقم (١) ، والثانية عند النوع رقم (٢) ، والثالثة والخامسة تنتهي في المكان نفسه ، وأعمقها جميعاً رقم (٤) . ( ويالهـا من مصادفة ، فقد حصلت على الارقام بالترتيب الصحيح تقريبـاً ! كلا ، فهذا هو السبب الذي دعا المجربين لترقيمها بهذه الطريقة ، ففي النشرة الاولى كانت الارقام بترتيب مختلف ! ) .

ولنلخص الآن ما تعلمناه بالشكل التالي: فهناك ثلاث صبغات على ما يبدو. وقد تكون هناك أنواع مختلفة عديدة من الخلايا المستقبلة الحاوية على الصبغات الثلاث بنسب مختلفة ، لكن هناك اتصالات عرضية عديدة قد تسمح بالاضافة أو الطرح من خلال الاضافة والتقوية في الجهاز العصبي. لذلك علينا قبل أن نفهم الرؤية اللونية تماماً ان نفهم الإحساس النهائي . وما زال هذا الموضوع مفتوحاً ، غير ان هذه الابحاث التي تستخدم المساري الكهربائية الصغيرة وما شابههـا قد تعطينا في النهاية معلومات أكثر عن كيفية رؤية اللون .

★ ★ ★

# أجوبة المسائل

## ـ الفصل السادس والعشرون ـ

٢٦ – ١ : $AK = 50\ ft$

$t = 60.0\ s$

ACB, AC′B, 60.1 s

٢٦ – ٢ : $T_{sp'} = 1.10\ T_{sp}, \quad PP' = 0.0425\ m$

٢٦ – ٣ : 2.0 cm

## ـ الفصل السابع والعشرون ـ

٢٧ – ١ : $y = \pm \sqrt{2(1 - 1/n) F' x - (1 - 1/n^2) x^2}$

٢٧ – ٣ : $d' = d/n$

٢٧ – ٤ : $M = F/f$

٢٧ – ٥ : ( أ ) 41/6 cm – 5 cm

٢٧ – ٧ : ( أ ) $2.7 \times 10^{-4}$ in ، (ب) 3.2 in

٢٧ – ٨ : $F = ff'/(f + f' - D)$ أو :

$1/F = 1/f + 1/f' - D/ff'$

$\Delta = fD/(f + f' - D)$ وتتجه من L إلى L′

$\Delta' = f'D/(f + f' - D)$ وتتجه من L′ إلى L

## – الفصل الثامن والعشرون –

٢٨ - ١ : (أ) $|A| = 2r \cos \theta/2$

(ب) $|A| = \dfrac{r \sin (N+1)\theta/2}{\sin \theta/2}$

## – الفصل التاسع والعشرون –

٢٩ – ١ : باتجاه الجنوب : $I = 0.17\ I_0$

باتجاه يميل على الجنوب بزاوية مقدارها $60°$ والى الغرب: $I = 3.0\,I_0$

باتجاه الغرب : $I = 5.8\ I_0$

٢٩ – ٢ : $I(\theta) = I_0 \dfrac{\sin^2 [\pi (1 - \cos\theta)]}{\sin^2 [\pi (1 - \cos\theta)/4]}$

٢٩ ٣ : $a \approx 21.5$ ثانية

## – الفصل الثلاثون –

٣٠ – ١ : $M = 1.6\ mm$

٣٠ – ٢ : $9.1\ km$

٣٠ – ٣ : (أ) $hF_2/F_1$

(ب) $\lambda_n = \dfrac{10^7}{nN} |\sin \theta_i - \sin \theta_d|$ أنغستروم

(ح) $D = 10^{-7}\ nNF_2/\cos \theta_d$

(ى) $w' = wF_2 \cos \theta_i/F_1 \cos \theta_d$

٣٠ - ٤ : ( أ ) $\theta = 51.9°$ (ب) 3750, 4370, 6560

(حـ) $5.6\ mm/A°$ (هـ) 0.007 انغستروم

٣٠ - ٧ : $I_t/I_o = \left| \dfrac{T^2}{1 - R^2\ e^{i4\pi D/\lambda}} \right|^2$

## ـ الفصل الواحد والثلاثون ـ

٣١ - ١ : قيمة قرينة الانكسار المقيسة هي $1 - n = 8.4 \times 10^{-6}$

٣١ - ٢ : من رتبة $10^7$ لكل سنتمتر مكعب .

٣١ - ٣ : $I = I_o\ e^{-Nq^2 z/\varepsilon_0 m\gamma c}$

٣١ - ٤ : ( أ ) $P = q^2\ \omega^4\ x_0^2/12\ \pi\ \varepsilon_0\ c^3$

(ب) $\gamma_R = q^2\ \omega^2/6\ \pi\ \varepsilon_0\ m\ c^3$

(جـ) $\Delta\lambda = \dfrac{2\pi c}{\omega^2}\ \gamma_R = 0.74 \times 10^{-3}\ A^0$

## ـ الفصل الثاني والثلاثون ـ

٣٢ - ٦ : $Ne \sim 10^7\ cm^{-3}$

٣٢ - ٩ : ( أ ) $\sigma = \dfrac{N^2\ \chi^2\ \omega^4\ q^2}{6\ \pi\ \varepsilon_o^2\ c^4} \left(\dfrac{E_\|}{E_o}\right)^2$

(ب) $\dfrac{E_\|}{E_o} = \cos\theta$

## ـ الفصل الثالث والثلاثون ـ

٣٣ - ٢ : $I_t/I_o = \dfrac{1}{2}\ (\alpha^4 + \varepsilon^4)\ \cos^2\theta + \alpha^2\ \varepsilon^2\ \sin^2\theta$

٣٣ - ٥ : $1.67 \times 10^{-2}$ mm

٣٣ - ٦ : 34.5 بالمئة . والصديقة تترك صديقها وهي مشمئزة

٣٣ - ٧ : (أ) 17 بالمئة ، (ب) $67.4°$

## الفصل الرابع والثلاثون

٣٤ - ١ : $z = A\theta + R\sin\theta, \; x = -R\cos\theta$

٣٤ - ٢ : $x = \frac{-v^2x}{R^2}\frac{1 - vR/cx}{(1 - vx/cR)^3}$

٣٤ - ٣ : $I_{max}/I_{min} = (1 + v/c)^4/(1 - v/c)^4$

٣٤ - ٦ : يقترب بسرعة مقدارها 510 km/s

٣٤ - ٧ : 600 mμ

٣٤ - ٨ : $150 \times 10^6$ km

٣٤ - ٩ : $R = 0.585/\rho$ ميكروناً

٣٤ - ١٠ : $dR/dt = 360$ m/s

# قائمة المصطلحات العلمية ★

| | | |
|---|---|---|
| **— A —** | | |
| Aberration | زيغ وجمعها زيوغ | ٢٧–٧ ، ٣٤–١٠ |
| Absorption | الامتصاص | ٣١–٨ |
| Angle of incidence | زاوية الورود | ٢٦–٣ |
| Angle of refraction | زاوية الانكسار | ٢٦–٣ |
| Angular frequency | التواتر الزاوي | ٢٩–٢ |
| Anomalous refraction | الانكسار الشاذ | ٣٣–٩ |
| Attenuation | التخفيف | ٣١–٨ |
| **— B —** | | |
| Birefringence | الانكسار المضاعف | ٣٣–٣ |
| Bremsstrahlung | برمشترالنغ (الانكباح) | ٣٤–٦ |
| Brewster angle | زاوية بروستر | ٣٣–٦ |
| **— C —** | | |
| Chromaticity | اللونية | ٣٥–٦ |
| Colour vision , | رؤية الألوان | ٣٥–١ |
| physiochemistry of, | الكيمياء الفيزيائية لرؤية الألوان | ٣٥–٩ |

★ نورد في العمود الايسر المصطلح العلمي باللغة الانكليزية ، وفي العمود الايمن ترجمته باللغة العربية وأرقام الفقرات التي جاء فيها .

محمد يوسف الدويشي

# محتويات الكتاب

## القسم الثاني

| الموضوع | الصفحة |
| --- | --- |

★ ★ ★

— تم بعونه تعالى —

VOLUME I

# THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS



FEYNMAN · LEIGHTON · SANDS

ثمن النسخة ( ٧٠٠ ) ق.س أو ما يعادلها